

**SÉRGIO LUIZ DE SOUZA**

**REVEGETAÇÃO DE ÁREA DE BIORREMEDIAÇÃO CONTAMINADA POR RESÍDUOS OLEOSOS  
DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do título e grau de Mestre em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Antonio José de Araujo

**CURITIBA**

**1999**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL


P A R E C E R

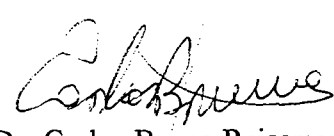
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **SÉRGIO LUIZ DE SOUZA**, sob o título "**REVEGETAÇÃO DE ÁREAS DE BIORREMEDIAÇÃO DE RESÍDUOS OLEOSOS PRODUZIDOS POR REFINARIA DE PETRÓLEO**", para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Florestais**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **SILVICULTURA**.

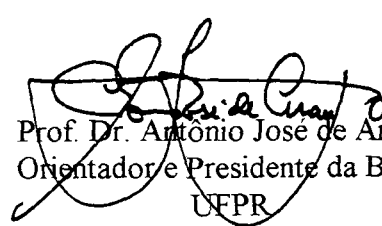
Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato são de parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, com média final: ( 8,5 ), correspondente ao conceito: ( A ).

Curitiba, 25 de junho de 1999



  
Prof. Dr. Francisco José Pereira de Campos Carvalho  
Primeiro Examinador  
UFPR

  
Prof. Dr. Carlos Bruno Reissmann  
Segundo Examinador  
UFPR

  
Prof. Dr. Antônio José de Araújo  
Orientador e Presidente da Banca  
UFPR

## **DEDICATÓRIA**

A Deus dedico e agradeço por esta oportunidade, pois somente pela absoluta certeza de sua presença em minha vida, é que foi possível a conclusão deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço pelo incentivo, apoio e principalmente pela paciência, à minha amada esposa Valdenisia; pelo zelo e incondicional amor à minha mãe Valdice e aos meus irmãos Rogério e Edmo Jr. Ao meu amado pai, que mesmo na sua luta pela vida, preocupou-se com a conclusão deste trabalho, por seu amor, pelas oportunidades que me concedeu, por minha vida, o meu maior agradecimento.

Agradeço ao professor Antonio José de Araujo pela amizade e valiosa orientação. Ao professor Francisco José Pereira de Campos Carvalho pela amizade, apoio e co-orientação no desenvolvimento deste trabalho. Aos professores co-orientadores, Carlos Bruno Reissmann e Celso Garcia Auer.

Agradeço aos amigos do convênio "Meio Ambiente e Tecnologia de Resíduos" PETROBRAS/FUNPAR, biólogos Cláudia Martins Gonçalves, Durval do Nascimento Neto, Michele Cristine Krenczynski, engenheiro florestal Leandro Paulino, que pelo extremo companheirismo e amizade auxiliaram-me nas difíceis etapas de instalação e monitoramento dos experimentos de campo e laboratório. Ao engenheiro agrônomo Rodrigo de Azevedo Castro pelo fornecimento de dados. Ao engenheiro agrônomo Sérgio Augusto Grendel, à EMBRAPA - CNPFlorestas e ao Instituto Ambiental do Paraná - IAP pela concessão das mudas. Ao técnico químico de petróleo Abacary pelo auxílio nas análises com os equipamentos de absorção atômica e emissão de plasma. À engenheira química de petróleo Maria Helena de Almeida Lima pela intermediação e apoio no desenvolvimento do trabalho nas instalações da REPAR. Aos operadores da UTDI da REPAR pela amizade que fizemos durante o período de convivência.

Enfim, a todos os professores, técnicos, amigos, até mesmo àquelas pessoas que desconheço os seus nomes, mas sei exatamente a importância de suas contribuições neste trabalho, o meu muito obrigado.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	VII
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1 RESÍDUOS OLEOSOS .....</b>	<b>3</b>
3.1.1 Origem das borras oleosas .....	3
3.1.2 Composição das borras oleosas.....	4
<b>3.2 TECNOLOGIAS PARA O TRATAMENTO DE RESÍDUOS OLEOSOS .....</b>	<b>8</b>
<b>3.3 BIORREMEDIAÇÃO .....</b>	<b>9</b>
3.3.1 Ecologia microbiana .....	11
<b>3.4 PRINCIPAIS FATORES QUE INTERFEREM NA BIODEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS .....</b>	<b>12</b>
3.4.1 Características do resíduo.....	12
3.4.2 Conteúdo de nutrientes .....	12
3.4.3 Temperatura .....	13
3.4.4 Umidade .....	13
3.4.5 pH.....	14
3.4.6 Metais pesados.....	14
3.4.7 Aeração .....	14
<b>3.5 TÉCNICAS APLICADAS NA BIORREMEDIAÇÃO .....</b>	<b>15</b>
3.5.1 <i>Landfarming</i> .....	15
3.5.2 Bioreatores e lavagem de solos contaminados .....	16
3.5.3 Compostagem .....	16
3.5.4 Método de manejo das águas subterrâneas ( <i>pump and treat</i> ) .....	17
3.5.5 Ventilação do solo ( <i>bioventing</i> ) .....	17

<b>3.6</b>	<b>TEMPO DE BIORREMEDIAÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>3.7</b>	<b>FITORREMEDIAÇÃO</b>	<b>18</b>
3.7.1	Histórico e aspectos gerais	18
3.7.2	Processos da fitorremediação	19
3.7.3	Rizosfera	21
3.7.4	Vantagens da fitorremediação	21
3.7.5	Limitações de uso	22
3.7.6	Seleção de espécies	23
<b>3.8</b>	<b>PLANTAS BIOACUMULADORAS DE METAIS</b>	<b>24</b>
3.8.1	Essencialidade dos elementos inorgânicos	25
3.8.2	Alguns macronutrientes e micronutrientes estudados	26
3.8.3	Plantas hiperacumuladoras	31
<b>3.9</b>	<b>SINTOMAS DE TOXIDEZ CAUSADO POR METAIS PESADOS</b>	<b>32</b>
<b>3.10</b>	<b>ABSORÇÃO, TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO DE ELEMENTOS NA PLANTA</b>	<b>34</b>
3.10.1	Absorção pela planta	34
3.10.2	Transporte e redistribuição	35
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>LOCALIZAÇÃO</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO</b>	<b>36</b>
4.2.1	Espécies utilizadas	36
4.2.2	Origem e composição dos resíduos	37
4.2.3	Taxa de aplicação dos resíduos	38
4.2.4	Plantio das mudas	39
<b>4.3</b>	<b>DELINEAMENTO ESTATÍSTICO</b>	<b>40</b>
<b>4.4</b>	<b>DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS</b>	<b>40</b>
4.4.1	Crescimento das plantas	40
4.4.2	Determinação da biomassa seca e diâmetro de colo	41
4.4.3	Teor de metais pesados, macronutrientes e micronutrientes	41

4.4.4	Análises de granulometria e química do solo .....	42
4.4.5	Conteúdo estimado da fração orgânica adicionada no solo .....	42
4.4.6	Capacidade de retenção de água no solo.....	43
4.4.7	Microporosidade, densidade real e aparente do solo .....	44
4.4.8	Atividade respiratória microbiana .....	44
4.4.9	Contagem de fungos e bactérias do solo da área 4 e 4T .....	45
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E CRESCIMENTO DAS PLANTAS .....</b>	<b>46</b>
5.1.1	Produção de biomassa e diâmetro de colo.....	54
5.1.2	Teores dos macronutrientes, micronutrientes e metais pesados em ipê amarelo, casuarina e aroeira .....	55
<b>5.2</b>	<b>SINTOMAS DAS PLANTAS OBSERVADOS NA ÁREA 4 E 4T.....</b>	<b>60</b>
<b>5.3</b>	<b>EFEITO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....</b>	<b>62</b>
<b>5.4</b>	<b>EFEITO NA FERTILIDADE DO SOLO .....</b>	<b>64</b>
<b>5.5</b>	<b>QUANTIDADES ESTIMADAS DA FRAÇÃO ORGÂNICA NAS PARCELAS DE AROEIRA, CASUARINA E IPÊ AMARELO .....</b>	<b>65</b>
<b>5.6</b>	<b>ANÁLISE MICROBIOLÓGICA DO SOLO.....</b>	<b>67</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>72</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DE ALGUNS LODOS DE REFINARIA .....	5
TABELA 2 - CONCENTRAÇÃO MÁXIMA DE METAIS NO SOLO (mg/kg).....	6
TABELA 3 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS (base seca) EM ESPÉCIES CONSIDERADAS HIPERACUMULADORAS.....	32
TABELA 4 - COMPOSIÇÃO (%) E CONCENTRAÇÃO (mg/l) DE METAIS DAS BORRAS OLEOSAS.....	38
TABELA 5 - ACÚMULO MÁXIMO DE METAIS NO SOLO PARA USO AGRÍCOLA (kg/ha) .....	39
TABELA 6 - ORIGEM, TAXA DE APLICAÇÃO (m <sup>3</sup> ) E ACÚMULO DE METAIS (kg/ha) NO SOLO DA ÁREA 4 .....	39
TABELA 7 - ALTURA MÉDIA (cm), INCREMENTO PERIÓDICO (cm) E SOBREVIVÊNCIA (%) AOS 918 DIAS APÓS O PLANTIO NA ÁREA 4 (CONTAMINADA) E ÁREA 4t (TESTEMUNHA) .....	47
TABELA 8 - BIOMASSA (peso seco em g) DE OITO PLANTAS NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA E CASUARINA NA ÁREA 4 (CONTAMINADA) AOS 530 DIAS APÓS O PLANTIO.....	54
TABELA 9 - BIOMASSA (peso seco em g) DE OITO PLANTAS NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA E CASUARINA NA ÁREA 4T (TESTEMUNHA) AOS 550 DIAS APÓS O PLANTIO ....	55
TABELA 10 - DIÂMETRO DE COLO (mm) DE IPÊ AMARELO, CASUARINA E AROEIRA NAS ÁREAS 4 E 4T AOS 550 DIAS APÓS O PLANTIO.....	55
TABELA 11 - TEOR MÉDIO (mg/kg da massa seca) DE METAIS NÃO ESSENCIAIS, MICRONUTRIENTES E MACRONUTRIENTES NA RAIZ, CAULE E FOLHA DE IPÊ, AROEIRA, CASUARINA NA ÁREA 4 .....	56
TABELA 12 -TEOR MÉDIO (mg/Kg da massa seca) DE METAIS NÃO ESSENCIAIS, MICRONUTRIENTES E MACRONUTRIENTES NA RAIZ, CAULE E FOLHA DE IPÊ, AROEIRA, CASUARINA NA ÁREA 4T .....	56



TABELA 13 - CONTEÚDOS (mg/massa seca produzida) DE METAIS NÃO ESSENCIAIS, MICRONUTRIENTES E MACRONUTRIENTES NA RAIZ, CAULE E FOLHA DE OITO PLANTAS NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA, CASUARINA NA ÁREA 4 .....	57
TABELA 14 - CONTEÚDOS (mg/massa seca produzida) DE METAIS NÃO ESSENCIAIS, MICRONUTRIENTES E MACRONUTRIENTES NA RAIZ, CAULE E FOLHA DE OITO PLANTAS NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA, CASUARINA NA ÁREA 4T .....	57
TABELA 15 - MICROPOROSIDADE DO SOLO (%).....	64
TABELA 16 - MÉDIA DAS DENSIDADES APARENTE ( $\mu_{AP}$ ) E REAL DO SOLO ( $\mu_{RE}$ ).....	64
TABELA 17 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO .....	64
TABELA 18 - ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO CONTAMINADO (ÁREA 4) E SOLO TESTEMUNHA (ÁREA 4T).....	65
TABELA 19 - QUANTIDADES ESTIMADAS DE FRAÇÃO ORGÂNICA ADICIONADA (%) (composto oleoso) NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA E CASUARINA AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO .....	66
TABELA 20 - DECRÉSCIMO DE FRAÇÃO ORGÂNICA OLEOSA (%) EM FUNÇÃO DO TEMPO..	67
TABELA 21 - ATIVIDADE RESPIRATÓRIA MICROBIANA (mg de CO <sub>2</sub> /100g de solo seco) DO SOLO DA ÁREA 4 (CONTAMINADA) E ÁREA 4T (TESTEMUNHA) AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO .....	68
TABELA 22 - CONTAGEM DE FUNGOS E BACTÉRIAS (colônias g <sup>-1</sup> de solo seco) DO SOLO DA ÁREA 4 NAS PARCELAS DE IPÊ, CASUARINA, AROEIRA, AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO .....	69
TABELA 23 - CONTAGEM DE FUNGOS E BACTÉRIAS (colônias g <sup>-1</sup> de solo seco) DO SOLO DA ÁREA 4T AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO .....	70
TABELA 24 - MÉDIAS TOTAIS DE FUNGOS E BACTÉRIAS NA ÁREA 4 E 4T AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO .....	70

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROCESSO NATURAL DE FITODESCONTAMINAÇÃO DO SOLO PELAS PLANTAS	20
FIGURA 2 - PROCESSO NATURAL DE FITOESTABILIZAÇÃO DE CONTAMINANTES DO SOLO	20
FIGURA 3 - PRINCIPAIS SINTOMAS DE TOXIDEX DE METAIS PESADOS NAS PLANTAS .....	33
FIGURA 4 - LISTA DAS ESPÉCIES UTILIZADAS, NATUREZA, VIVEIRO DE PRODUÇÃO E IDADE NO PLANTIO .....	37
FIGURA 5 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE EUCALIPTO DO PLANTIO AOS DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	48
FIGURA 6 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE TIPUANA DO PLANTIO AOS DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	48
FIGURA 7 -CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE AROEIRA DO PLANTIO AOS DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	49
FIGURA 8 -CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE PITANGA DO PLANTIO AOS DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	49
FIGURA 9 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE CANAFÍSTULA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	50
FIGURA 10 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE GUABIROBA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	50
FIGURA 11 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE CASUARINA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	51
FIGURA 12 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE CUPRESSUS DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	51
FIGURA 13 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE IPÊ DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	52
FIGURA 14 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE ERVA-MATE DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	52

FIGURA 15 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE CINAMOMO DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	53
FIGURA 16 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE BRACATINGA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO .....	53
FIGURA 17 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE ACÁCIA NEGRA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO.....	54
FIGURA 18 - SINTOMAS DE DESEQUILÍBRIO NUTRICIONAL NAS 13 ESPÉCIES NAS ÁREAS 4 E ÁREA 4T .....	61
FIGURA 19 - CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO DA ÁREA 4 E ÁREA 4T EM CONDIÇÕES DE CAMPO .....	63
FIGURA 20 - CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO DA ÁREA 4 E ÁREA 4T EM CONDIÇÕES DE TFSA (terra fina seca ao ar) .....	63

## RESUMO

A produção diária de borras oleosas resultantes do processamento do petróleo, vem causando dificuldades às indústrias do setor petrolífero em relação ao armazenamento, disposição final e monitoramento desses resíduos, que podem gerar riscos para a saúde humana e para o meio ambiente. A degradação de resíduos industriais no solo é uma técnica de tratamento com menor custo financeiro quando comparado a outros métodos como incineração e pirólise. Além de que, apresenta resultados satisfatórios na eliminação das borras oleosas quando são oferecidas condições físico químicas adequadas para a biodegradação pela população microbiana do solo. A utilização de plantas no processo de biorremediação, recentemente chamada de fitorremediação, vêm destacando-se pela comprovada capacidade de degradação de contaminantes e absorção de metais pesados pela rizosfera. Baixo custo financeiro, facilidade de monitoramento e melhor aceitação visual são algumas vantagens desta técnica. Pelo fato da descontaminação do solo através das plantas ser uma técnica recente, no Brasil ainda são poucos os trabalhos publicados sobre espécies com esta habilidade e não existem referências na legislação. Mas, pesquisas indicam que as principais restrições de aplicação da fitorremediação consistem no tempo de biorremediação, heterogeneidade dos resíduos, textura do solo e profundidade do lençol freático. Neste trabalho foram testadas e avaliadas num período de 918 dias 13 espécies de árvores para a revegetação de uma área de biodegradação de borras oleosas (área de biorremediação) da refinaria Presidente Getúlio Vargas PETROBRAS / REPAR no Paraná, Brasil. Em parcelas de *Casuarina equisetifolia*, *Schinus terebinthifolius*, *Tabebuia chrysotricha* foram feitas enumerações da população microbiana do solo, determinação da atividade respiratória microbiana do solo, determinação do conteúdo de nutrientes e metais pesados nas plantas e produtividade da massa seca. Foram determinadas as modificações nos teores de nutrientes e na capacidade de retenção de água do solo após a aplicação da borra oleosa. *Casuarina equisetifolia*, *Peltophorum dubium* e *Cupressus lusitanica* foram as espécies mais tolerantes aos resíduos (sobrevivência maior do que 81%). *Mimosa scabrella*, *Ilex paraguariensis*, *Tipuana tipu* foram as espécies com menor sobrevivência (19%, 11% e 12% respectivamente). *C. equisetifolia* acumulou maiores conteúdos de metais pesados na massa seca. Os testes na área de biorremediação foram comparados com uma área testemunha.

**Palavras-chave:** Biorremediação, fitorremediação, áreas degradadas, resíduos oleosos, revegetação.

## ABSTRACT

The oily dregs produced daily, as result of the petroleum processing system, has been causing major concern to oil refining industries, with regard to storage, final disposal and residues control. Such residues could generate human health hazard and environment menace, if not properly handled. Soil degradation of industrial residues, is a less expensive method and technique, if compared with others technologies, such as incineration and pyrolysis. Biodegradation shows satisfactory results on oily dregs elimination, when satisfactory physical and chemical conditions are available or supplied. The recent denominated phytoremediation method, which foresee the utilization of plants for the bioremediation process, has been successful, in virtue of its corroborated capacity of degradation of the contaminants and contaminants assimilation of the heavy metals residues by the rhizosphere. The advantages of these techniques are: smaller costs, easy control and best visual effects, among others. Since phytoremediation is a recent technique in Brazil, there are very few scientific works published regarding to the species of plants which shows these abilities, nor are legislation references about it. Research results indicate the principal restrictions for phytoremediation, which are: bioremediation interregnum, residues heterogeneity, soil texture and acquifers depths. On this particular work, it was tested the development of planted trees, during 918 days starting at plantation date. Thirteen trees species were used for reforestation of a given biodegradation site, where oily dregs were dumped, located at the refinery Presidente Getúlio Vargas REPAR - PETROBRAS, Paraná, Brazil. On plots of *Casuarina equisetifolia*, *Schinus therebinthifolius* and *Tabebuia chrysotricha* the following tests were conducted: microbial population counting, microbial respiration activities, soil nutrients, heavy metals contents on the plants and dry material productivity. After the oily dregs disposal on the site, tests and measurements to determinate humidity retention and nutrients contents of the soil were performed. *Casuarina equisetifolia*, *Peltophorum dubium* and *Cupressus lusitanica* were the species, which showed satisfactory toleration to the residues (survival rate higher than 81%). *Mimosa scabrella*, *Ilex paraguariensis*, *Tipuana tipu* were the species which has showed lower survival rate (19%, 11%, 12% respectively). *C. equisetifolia* did accumulate the highest content rate for heavy metals at the dry material measurements. All tests at the bioremediation site were compared with a non-residue plantation site used as control purposes.

**Palavras-chave:** Bioremediation, phytoremediation, wasteland reclamation, oily residues, reforestation.

## 1 INTRODUÇÃO

No processo de produção de refinados de petróleo, é inevitável a produção constante e diária de resíduos. Com as crescentes e justificadas exigências da legislação ambiental, vem a preocupação das indústrias conscientes de minimizar o impacto causado com a disposição final destes rejeitos no ambiente.

O armazenamento e descarte dos rejeitos, provenientes dos processos de craqueamento e destilação do óleo cru, constituem-se num dos principais problemas ambientais na atividade de uma refinaria de petróleo e das indústrias de subprodutos derivados. Portanto, existe a necessidade de aplicação de tecnologias que amenizem ou eliminem os possíveis impactos negativos causados por estes resíduos. Dentre estas técnicas, as áreas de biorremediação e *landfarming* utilizam o solo como meio de biodegradação dos lodos poluentes que, nesta atividade, são denominados de borras oleosas.

Este estudo testa a hipótese de utilização de espécies florestais para revegetação de uma área de biorremediação, bem como os efeitos nas propriedades físico químicas do solo que recebeu os descartes dos resíduos não recuperáveis (borras oleosas) dos tratamentos primários e secundários das águas residuais da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (PETROBRAS S.A - REPAR), localizada no município de Araucária, PR.

Foram plantadas na área de biorremediação, mudas de 13 espécies as quais foram avaliadas em relação ao crescimento e sobrevivência durante um período de 3 anos após o plantio.

## 2 OBJETIVOS

Avaliar o desenvolvimento de 13 espécies arbóreas até o final dos 918 dias após o plantio, em uma área de empréstimo contaminada com resíduos oleosos, e comparar com uma área não contaminada.

Determinar os efeitos dos resíduos nas propriedades físicas do solo, em relação à microporosidade, capacidade de retenção de água e densidade real e aparente do solo.

Determinar os teores dos metais não essenciais (Al, Sb, Cr, Pb), metais essenciais benéficos (Zn, Cu, Fe), essenciais restritos (Na, Ni, V) e os macronutrientes Ca, Mg, K na raiz, caule e folhas de ipê amarelo, casuarina e aroeira plantadas na área contaminada com resíduos oleosos e comparar com uma área não contaminada.

Determinar a produção da massa seca da raiz, caule, folha das três espécies citadas acima, bem como os diâmetros de colo de cada espécie, comparando com uma área testemunha.

Contagem da população de fungos e bactérias no solo da área de biorremediação e área testemunha.

Determinação da atividade respiratória microbiana no solo da área de biorremediação e área testemunha através da eliminação do CO<sub>2</sub>.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 RESÍDUOS OLEOSOS

Conforme a ABNT (1987), os resíduos oleosos são classificados como Classe I, ou seja, são materiais tóxicos e devem ser tratados ou armazenados de maneira que não causem danos ao homem e meio ambiente. As borras oleosas constituem-se de uma variedade de compostos sólidos, semi-sólidos, pastosos e líquidos originados de diferentes processos industriais.

##### 3.1.1 Origem das borras oleosas

Em geral, as indústrias do setor petrolífero, possuem suas próprias estações de tratamento de águas residuais, compostas basicamente por três etapas de limpeza e depuração da água:

- a) Tratamento primário: Dá-se a separação da água e do óleo juntamente com partículas sólidas sobrenadantes. Esta separação é feita em piscinas de separação de água e óleo (SAO) e a retirada da fase sobrenadante é feita através de flautas móveis de arraste;
- b) Tratamento secundário: Retira as partículas sólidas em suspensão na água (argilas e agregados). Esta separação é feita em tanques de flotação e floculação dos sedimentos. No tratatamento secundário, ocorre também a digestão aeróbica da água residual, promovida pela população de microrganismos presentes no lodo ativado;
- c) Tratamento terciário: É a fase final do processo de depuração da água residual que consiste na permanência, em uma lagoa de estabilização, da água provinda do tratamento aeróbico. Nesta fase, os compostos inorgânicos residuais remanescentes são consumidos principalmente por algas e pela microfauna aquática (BARTHA, 1986). As borras oleosas são constituídas principalmente pelos materiais não retidos nos tratamentos primário e secundário.



Além dos rejeitos provenientes das estações de tratamento de efluentes (ETE), as borras ainda podem proceder das limpezas dos separadores de água e óleo, limpeza dos diques e fundos dos tanques, limpeza de canaletas e caixas de drenagem, limpeza de lagoas para estabilização de efluentes, serragens e palhadas contaminadas com óleo.

### 3.1.2 Composição das borras oleosas

A composição das borras é bastante variável, visto que são diversas fontes que as originam e fatores como qualidade do petróleo refinado, eficiência de equipamentos e qualidade no processo interferem na sua composição. Basicamente, constitui-se de água, areia, graxas, óleos, compostos orgânicos e minerais, compostos químicos e metais pesados como Zn, Cr, Vn, Pb, Fe e outros em pequenas quantidades (CASARINI, 1987<sup>1</sup>, citado por MIELNICZUK, 1991). A fase oleosa é composta por uma mistura complexa de numerosos constituintes orgânicos.

O excesso de lodo secundário ou lodo resultante do processo biológico, produzido pela etapa de digestão biológica, é adicionado ao lodo proveniente das fases anteriores (separações física e físico-químicas do tratamento primário). Esta mistura promove na borra oleosa uma pré-inoculação de microrganismos hábeis na digestão de compostos de difícil degradação, o que provavelmente contribui de forma favorável para decomposição no solo. A tabela 1 mostra a composição média de alguns lodos de refinarias (DEWOLF; NELSON, 1988).

---

<sup>1</sup> CASARINI, D. C. P.; MACEDO, R. M.; CUNHA, R. C. A.; MAUGER, J. C. O. The Development Techniqueto Evaluate the Biodegradation of oily sludge in *landfarming* system. In: GOETEMMS, E. M. P.; FLORES, P. G.; ALMEIDA, S. A. S. **International seminar ob waste management in petrochemical complexes**. Porto Alegre, 26/28 october, 1987. p. 243-252.

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DE ALGUNS LODOS DE REFINARIA

TIPO DE LODO	COMPOSIÇÃO (%)		
	ÓLEO	ÁGUA	SÓLIDOS
Emulsão oleosa sólida (água bruta)	1 - 49	30 - 98	1 - 21
Lodo flotado	1 - 30	40 - 92	7 - 30
Separador de água e óleo API	1 - 61	15 - 98	1 - 30

FONTE: DEWOLF; NELSON, 1988

### 3.1.2.1 Metais pesados

Pode também receber o nome de *elemento traço* ou *metal traço*, mas o termo *metal pesado* parece ter sido o mais utilizado para designar os metais que causam danos ao ar, água, solo, plantas e animais. Talvez seja imprópria esta conotação de agressor ao ambiente e aos seres vivos, pois conforme a dose em que se apresenta, alguns deles são indispensáveis na constituição e fisiologia de animais e plantas.

Quimicamente, é considerado um metal pesado o elemento que possui peso específico maior que  $5 \text{ g/cm}^3$  ou que possui um número atômico maior que 20 (MALAVOLTA, 1984). Ao meio ambiente, o excesso destes elementos são considerados poluentes (ecotoxicidade); aos animais e seres humanos, o desbalanceamento quantitativo causa alterações fisiológicas promotoras de doenças (toxicidade) e no caso das plantas, principalmente as produtoras de alimentos, causam a redução da produtividade (fitotoxicidade).

A tabela 2, mostra algumas regulamentações sobre a quantidade máxima permitida para o acúmulo de metais pesados no solo. Observa-se grande variabilidade dos valores entre as colunas. Isto é devido aos métodos de determinação da concentração máxima de metais utilizarem diferentes critérios de análise dos metais e seus efeitos (RICHARDSON; JESSIMAN, 1992).

Portanto, nota-se que o assunto *metal pesado* é de difícil discussão entre as diferentes áreas das ciências. Neste trabalho, restringiu-se a discussão à área ambiental, especificamente na utilização de plantas superiores e dos processos físicos, químicos e biológicos do solo para reduzir os efeitos negativos destes metais no solo.

TABELA 2 - CONCENTRAÇÃO MÁXIMA DE METAIS NO SOLO (mg/kg)

METAL	ALBERTA <sup>(a)</sup>	BRITISH COLUMBIA <sup>(b)</sup>	NEW JERSEY <sup>(c)</sup>	ONTARIO <sup>(d)</sup>	QUEBEC <sup>(e)</sup>	AERIS <sup>(f)</sup>	CALIFORNIA U.S.EPA <sup>(g)</sup>	U.S. ARMY <sup>(h)</sup>
Ar	10	30	20	25	30	-	-	-
Ba	400	1000	400	1000	500	-	-	-
Cd	1	5	3	4	5	3,2	3,19	1,34
Cr	100	250	100	1000	250	-	-	-
Co	20	50	-	50	50	-	-	-
Cu	80	100	170	200	100	-	-	-
Pb	50	500	1000	500	200	254	254	420
Hg	0.2	2	1	1	2	-	-	-
Ni	40	100	100	200	100	4320	4319	285
Vn	50	-	100	250	-	-	-	-
Zn	120	500	350	800	500	1940	19304	1393

FONTE: RICHARDSON; JESSIMAN, 1992.

NOTAS: <sup>(a)</sup> Alberta Tier I criteria for contaminated soil assessment and remediation.

<sup>(b)</sup> Criteria for managing contaminated sites in British Columbia.

<sup>(c)</sup> Basis for njdep interim soil action levels. N.J. Department of Environmental Protection.

<sup>(d)</sup> Guidelines for the decommissioning and cleanup of sites in Ontario.

<sup>(e)</sup> Contaminated soil cleanup rehabilitation policy. Quebec Ministère de l'environnement.

<sup>(f)</sup> Contaminated soil cleanup in Canada.

<sup>(g)</sup> The California site mitigation decision tree manual.

<sup>(h)</sup> An environmental fate model leading to preliminary pollutant limit values for human health effects

### 3.1.2.2

#### 3.1.2.2 Lodo biológico

O processo de lodos ativados foi desenvolvido em 1914 na Inglaterra e, ainda hoje, utiliza-se esta técnica para o tratamento de águas residuais domésticas e industriais. Nas estações de tratamento de efluentes (ETE), os tanques de digestão biológica promovem a oxigenação do efluente

para o desenvolvimento de microrganismos. Estes, principalmente as bactérias, formam aglomerados denominados *flocos biológicos* que, através de tanques de sedimentação, são separados e, em parte, retornados aos tanques de aeração para a manutenção da população microbiana (BRANCO, 1986).

A destinação final de lodos, com objetivo de reduzir o despejo poluente em rios, pode ser a incineração, degradação no solo e utilização florestal e agrícola. Existe uma forte tendência de utilização para fins agrícolas, mas a principal restrição é a presença de agentes patógenos e metais pesados. No Brasil, a utilização do lodo biológico doméstico e industrial para fins agrícolas ou florestais, é restritiva tanto social, como tecnicamente, visto que ainda existe resistência de agricultores à utilização de compostos constituídos de lodos e mesmo as técnicas de eliminação ou redução de agentes patógenos (ovos e cistos de helmintos) ainda são de difícil aplicabilidade (BARBIER et al., 1990).

Considerando a aplicação no solo, pesquisas indicam que a redução do número de ovos de *Ascaris* e *Salmonella*, tende a ser mais rápida quando o lodo ou composto é aplicado no inverno, e que estes agentes patógenos morrem rapidamente com a redução brusca de pH (2,9 a 3,7) (PHILIPP; STRAUCH, 1987; STRAUCH et al., 1981). Temperaturas acima de 55°C também contribuem para a redução destes organismos indesejáveis (SHUVAL et al., 1991). Portanto, a aplicação de lodo biológico ou compostos deve ser evitada quando os organismos patogênicos não são eliminados ou reduzidos a níveis aceitáveis.

Além de contribuir na adição de matéria orgânica, incrementando as propriedades físicas de retenção de água e aeração, o lodo contribui para aumentar a biomassa microbiana e a quantidade de nutrientes disponíveis no solo. São vários os pesquisadores que comprovam o aumento de nutrientes disponíveis no solo que recebeu lodo biológico (LIGO, 1988; SANTOS FILHO, TOURINHO, 1981; BERRY, 1983; MEDALIE; BOWDEN; SMITH, 1994; GRENIER, 1989), principalmente o nitrogênio através do  $\text{NO}_3\text{-N}$  e  $\text{NH}_4\text{-N}$  (ASCHMANN, 1990).

Os metais pesados também estão presentes nos lodos das ETE, principalmente em efluentes industriais, e constituem um fator limitante para a disposição no solo. Existem alguns métodos para a

captura destes metais, através de meios biológicos, químicos, químico-biológicos. Entretanto, o alto custo destes métodos inviabiliza a retirada dos metais do lodo (TAKAMATSU, 1996).

### 3.1.2.3 Compostos químicos orgânicos

Estão presentes na borra oleosa inúmeros compostos químicos orgânicos com grandes variações qualitativas e quantitativas. Fatores como a qualidade do petróleo, vazamentos e alterações no processo de separação de óleo e água, limpeza de equipamentos e tubulações com solventes e mistura com resíduos acumulados anteriormente contribuem para a variabilidade na composição de químicos nas borras oleosas.

Sabe-se que os resíduos do processamento do petróleo são constituídos de compostos polares e de hidrocarbonetos. Os compostos polares possuem moléculas que contém N, S e O adicionados ao carbono e hidrogênio e são representados por asfaltenos e resinas. Os hidrocarbonetos constituem-se de cadeias saturadas ou aromáticas. As cadeias saturadas formam alcanos e compostos cíclicos. Nos alcanos, as ligações podem ser simples ou ramificadas. Os hidrocarbonetos com cadeias aromáticas são classificados como mononucleares e polinucleares (PAH) (HUESEMANN, 1994).

Em pesquisas realizadas por KARR; LYSJY (1985)<sup>2</sup>, citado por MIELNICZUK (1991), os PAH foram encontrados em diversos resíduos provenientes dos separadores de água e óleo de indústrias petroquímicas e a correlação química/toxicológica revelou que os PAH contribuem significativamente para as propriedades toxicológicas do resíduo.

## 3.2 TECNOLOGIAS PARA O TRATAMENTO DE RESÍDUOS OLEOSOS

Segundo a ABNT (1987), dentro da NBR-10004 (resíduos sólidos - classificação),

---

<sup>2</sup> KARR, L. A ; LYSJY, T. Identification of toxicity sources in waste matter by correlation of chemical and toxicological parameters. **American Chemical Society**, Washington, p. 17-21, 1985.

categoriza a borra oleosa como sendo resíduo sólido perigoso, podendo causar poluição ambiental do ar, água e/ou solo, bem como poluição visual. Exige cuidados adequados no seu manuseio, tratamento e disposição final.

A resolução nº 9 do CONAMA (1993), proíbe quaisquer descarte de resíduos perigosos em solos, águas superficiais, subterrâneas, no mar territorial e em sistemas de esgoto ou evacuação de águas residuais, sem tratamento prévio, que assegure a eliminação das características tóxicas e poluentes do resíduo, bem como a preservação dos recursos naturais e atendimento aos padrões de qualidade ambiental.

As técnicas mais utilizadas para o tratamento dos resíduos sólidos são a pirólise, incineração e degradação no solo. A pirólise utiliza-se de processos químicos para decomposição através do calor e da ausência de oxigênio. No entanto, ocorre a formação de grande quantidade de gases que podem apresentar igual, ou até mesmo maior toxidez que o resíduo original. A incineração é a combustão controlada do resíduo, geralmente de alto custo operacional, originando gases e cinzas que também podem causar danos ao homem e ao meio ambiente. A pirólise e a incineração, apesar de serem eficientes na eliminação do resíduo sólido, produzem rejeitos sólidos e gasosos que devem ser tratados paralelamente através de sistemas de tratamento de gases, tornando estes métodos ainda mais onerosos. A degradação no solo torna-se a opção mais viável, dependendo das características físico-químicas do resíduo. É também a alternativa mais pesquisada para o tratamento de resíduos pesados como as borras oleosas, principalmente pelas vantagens de menor custo, facilidade no manejo do sistema e menor riscos de impactos negativos no ambiente (MIELNICZUK, 1991).

### 3.3 BIORREMEDIAÇÃO

A capacidade de extração, retenção e transformação de compostos orgânicos e inorgânicos do solo é teoricamente viável a todo organismo vivo. Certas bactérias, fungos, algas e plantas são capazes de extrair e concentrar contaminantes através mecanismos de assimilação, níveis normalmente tóxicos de alguns inorgânicos dispersos no ar ou no solo.

A biorremediação, ou biodegradação no solo, consiste na utilização de microrganismos que, através de vias metabólicas, promovem reações químicas e processos físicos que transformam compostos de difícil degradação em subprodutos mais facilmente degradáveis. A completa biodegradação de um substrato, como os resíduos oleosos, é chamada de mineralização e resulta na formação de biomassa microbiana, CO<sub>2</sub>, água e produtos inorgânicos (ALEXANDER, 1980). A biorremediação tem sido usada principalmente para remover contaminantes pesados do solo através dos microrganismos nativos ou adaptados que convertem compostos orgânicos nos subprodutos citados acima (HUESEMAN, 1994).

A adição de resíduos no solo, pode aumentar espontaneamente a degradação biológica, quando isto não ocorre, procura-se promover o aumento da atividade microbiana (GRUIZ; KRISTON, 1995). Técnicas como a inoculação de microrganismos hábeis na degradação de compostos oleosos, aplicação de enzimas imobilizadas e o uso de plantas para conter e transformar poluentes, são utilizadas para melhorar a capacidade de degradação dos resíduos oleosos no solo (BOLLAG; MERTZ; OTJEN, 1994). Esta técnica quando utiliza exclusivamente a população microbiana do solo, tem custos de até quatro vezes menos do que tecnologias comerciais como a incineração ou aterros industriais.

Fatores como aeração, nutrição e umidade, interferem no processo de biodegradação (GRUIZ; KRISTON, 1995). A quantidade, as características físico-químicas, a disponibilidade dos contaminantes, a temperatura e a presença de compostos inibidores também alteram o processo de biorremediação (SKLADANY; METTING; BLAINE, 1992). Entretanto, fatores como a toxidez variável dos resíduos, manejo inadequado do solo, dificuldades analíticas para determinação da velocidade de degradação, o desconhecimento da ecologia da maioria destes microrganismos especializados, fazem diminuir a eficiência de degradação do resíduo no solo (GRUIZ; KRISTON, 1995).

A biorremediação pode ser *ex situ*, na qual o solo contaminado é transportado até o local em que será feito o tratamento de limpeza do poluente e, geralmente é feito na superfície do solo. Já a biorremediação *in situ*, dá-se geralmente na sub-superfície do solo e o processo de retirada do poluente é feito no próprio local da contaminação. Na categoria *ex situ*, utilizam-se os processos de *landfarming*, bioreatores, lavagem do solo e compostagem. No tratamento do solo *in situ*, é tratado o

solo sub-superficial, utilizando o manejo das águas subterrâneas (*pump and treat*) e a ventilação do solo (*bioventing*). No manejo das águas subterrâneas, a infiltração e retirada de água são meios de adicionar oxigênio e nutrientes para estimular a atividade microbiana (SKLADANY; METTING; BLAINE, 1992).

O uso das plantas associadas à microbiota vem sendo considerado como um avanço no processo de biorremediação, que através das modificações causadas no solo e das técnicas agronômicas, podem remover, conter e promover menos prejuízos ambientais causados por contaminantes. A **fitorremediação** pode ser aplicada *in situ* ou *ex situ* e será discutida na seção 3.7 deste trabalho.

### 3.3.1 Ecologia microbiana

Alguns estudos vem mostrando os efeitos da adição de microrganismos alóctones (não nativos) no solo. Muitas vezes a degradação dos compostos são atribuídas à população microbiana nativa mesmo após a introdução de organismos especializados.

A principal limitação na utilização desta técnica é a baixa sobrevivência dos microrganismos introduzidos, provavelmente devido a baixa capacidade de competição com organismos nativos. Por outro lado, GONÇALVEZ (1997) observou em seus experimentos *in vitro*, a aceleração acima de 236% na degradação de resíduos de refinaria com a inoculação de microrganismos especializados. A utilização de inóculos de microrganismos é recomendada em solos recentemente contaminados, quando o contaminante é de difícil degradação, quando possui elevados teores de metal pesado, quando é exigida uma rápida descontaminação e quando a concentração do contaminante é baixa (PIOTROWSKI, 1991<sup>3</sup>, citado por BEWLEY, 1992).

A adição de um segundo substrato, também pode favorecer a degradação de um composto que não oferece suficientemente o carbono orgânico ou nutrientes aos microrganismos. Este

---

<sup>3</sup> PIOTROWSKI, M. R., Bioremediation. *Hazmat World*, v. 4, p. 47-49, 1991.



processo é chamado de cometabolismo (SKLADANY; METTING; BLAINE, 1992). Entretanto, a degradação de compostos de difícil decomposição pode ser reprimida pela presença de outro substrato facilmente degradável (ECKENFELDER; NORRIS, 1993; ALEXANDER, 1980; BOSSERT; BARTHA, 1985), pois sabe-se que a taxa de crescimento microbiano é relacionado com a concentração e a diversidade do substrato (ATLAS; BARTHA, 1981).

Dentro da grande variabilidade de microrganismos encontrados no solo, 3 a 17% são capazes de sintetizar resíduos oleosos e outros compostos de cadeia longa. Os hidrocarbonetos de são consumidos por uma variedade de microrganismos como *Mycobacterium*, *Nocardia*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Corynebacterium*, *Acinetobacter* e *Bacillus* (ALEXANDER, 1980). As técnicas de contagem microbiana em placas e determinação do pH no solo podem indicar a presença de algum fator limitante no processo de biodegradação (ECKENFELDER; NORRIS, 1993).

### 3.4 PRINCIPAIS FATORES QUE INTERFEREM NA BIODEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS

#### 3.4.1 Características do resíduo

As características físico-químicas como densidade, solubilidade e volatilidade dos resíduos devem ser consideradas no processo de biorremediação. Compostos menos densos que a água são mais facilmente degradados devido a dificuldade de lixiviação. Altas taxas de degradação são conseguidas quando o contaminante possui baixo peso molecular (SKLADANY; METTING; BLAINE, 1992).

#### 3.4.2 Conteúdo de nutrientes

N e P são os nutrientes mais requisitados na biodegradação no solo. As quantidades necessárias destes elementos são estabelecidas pela quantidade de C disponível, incluindo-se o C do resíduo. Geralmente as relações N:P:K de 100:10:1, 120:10:1 e 100:4:1 são utilizadas na biodegradação de resíduos no solo.

GUDIN; SYRATT (1975) comprovaram o aumento da degradação de resíduos oleosos de refinaria adicionando N na forma de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , também verificaram a diminuição da relação C:N e o aumento na competitividade por este nutriente entre a população microbiana e a vegetação. BROWN; DONNELLY; DEUEL (1983) também verificaram maior taxa de degradação de lodos oleosos de refinarias petroquímicas com a incorporação no solo de uma mistura de N, P e K na taxa de 1,2% do conteúdo de carbono orgânico no solo.

Muitas vezes o próprio fertilizante pode ser um fator limitante na degradação de resíduos oleosos devido a sua pronta disponibilidade aos microrganismos. Uma alternativa para evitar este efeito é a utilização de fertilizante na forma oleofílica, como por exemplo a uréia parafinizada (BEWLEY, 1992).

#### 3.4.3 Temperatura

A temperatura é um importante fator nas reações bioquímicas promovidas pela população microbiana. Geralmente a atividade microbiana decresce com a diminuição da temperatura (SKLADANY; METTING; BLAINE, 1992; DIBBLE; BARTHA, 1979a).

A oxidação de compostos oleosos geralmente ocorre no intervalo de 0 até 55°C. Em locais onde encontram-se microrganismos termófilos, a velocidade de reação a temperaturas elevadas é bastante rápida. Na temperatura de 0°C ou abaixo disto, a degradação desses compostos é extremamente lenta (ALEXANDER, 1980).

#### 3.4.4 Umidade

A presença da água é fundamental para a comunidade microbiana. Entretanto a presença de oxigênio é o maior limitante para microrganismos aeróbicos. A falta de oxigênio é causada principalmente pelo excesso de água no solo (SKLADANY; METTING; BLAINE, 1992).

Na condição de inundação, a população microbiana aeróbia se reduz, incentivando o desenvolvimento de microrganismos anaeróbios ou resistentes aos baixos níveis de oxigênio. A

quantidade ótima de umidade para a população microbiana está em torno de 50 a 60% da capacidade de retenção de umidade do solo (ALEXANDER, 1980).

#### 3.4.5 pH

No processo de biorremediação, é necessário que o pH seja compatível com os microrganismos. Bactérias desenvolvem-se com um pH ótimo entre 5 e 9, enquanto que os fungos que degradam compostos complexos, tem o pH ótimo de 5 ou menos (SKALADANY; METTING, 1992).

Muitas espécies de fungos desenvolvem-se em grandes intervalos de pH, desde o extremo de 9 até 3 a 4. Mas pelo fato das bactérias e actinomicetos dominarem em solo de pH próximo ao neutro, os fungos geralmente dominam as áreas com baixo pH (ALEXANDER, 1980).

#### 3.4.6 Metais pesados

Muitas vezes a indisponibilidade do metal ao microrganismo, pode dar condições para o desenvolvimento da população microbiana e da vegetação, como verificado num vazamento de gás natural ocorrido em 1929, onde a quantidade de Mn disponível passou de 0 para 1,6 meq mas com contínuas arações do solo, este conteúdo foi indisponibilizado aos microrganismos e à vegetação (SCHOLLENBERGER, 1930).

#### 3.4.7 Aeração

Tratando-se de microrganismos aeróbios, a aeração é indispensável e, é o fator mais limitante no processo de biodegradação. O aumento na degradação dos compostos oleosos através da aeração do solo é amplamente comprovada na literatura (GRUIZ; KRISTON, 1995; ATLAS; BARTHA, 1981; SCHOLLENBERGER, 1930).

### 3.5 TÉCNICAS APLICADAS NA BIORREMEDIAÇÃO

#### 3.5.1 *Landfarming*

É o método mais utilizado para biodegradação de borras oleosas, principalmente por refinarias de petróleo e indústrias petroquímicas. O *landfarming* tem a finalidade específica de degradação de resíduos semi-sólidos, pastosos ou líquidos (BARTHA; BOSSERT, 1984).

Geralmente, são formados por áreas com cerca de 0,5 - 1,0 ha, denominadas células de biodegradação, as quais recebem uma camada compactada de argila para evitar a lixiviação de metais e compostos orgânicos poluentes das águas subterrâneas, um sistema de drenagem e uma camada reativa de solo, preparada para receber o resíduo (RANGEL; FRANTZ; BASTIANI, 1988). Na camada reativa ou zona de tratamento, a água superficial é controlada e monitorada para evitar carência de oxigênio, bem como é feito o revolvimento periódico do solo para aeração e incorporação da mistura resíduo + água + microrganismos e, eventualmente, nutrientes (N-P-K) (LYNCH, 1989; GRUIZ; KRISTON, 1995).

Apesar das vantagens citadas na literatura, o sistema *landfarming* muitas vezes torna-se pouco eficiente na biodegradação dos resíduos, principalmente pela ausência de monitoramento de fatores que alteram a habilidade de degradação pelos microrganismos, como aeração, umidade, pH da camada reativa, conteúdo de nutrientes, toxidez, frequência e taxa de aplicação do resíduo (DIBBLE; BARTHA, 1979b). Outro fator limitante é a formação de resíduos ou subprodutos de compostos de difícil degradação biológica (HARMSSEN, 1991; BOSSERT; KACHEL; BARTHA, 1984).

Em *landfarming* com solo argiloso e compacto, a adição de materiais de baixo custo e fácil disponibilidade como serragens, casca de algodão e palhadas podem trazer efeitos benéficos no processo de biodegradação aeróbia, facilitando a mistura e revolvimento do solo/resíduo, auxiliando a drenagem de águas superficiais e restando a umidade do solo em períodos de secas (HUESEMANN, 1994).

O manejo da camada reativa e a seletividade do resíduo, através de revolvimentos

periódicos do solo (HUESEMANN, 1994) e testes de toxicidade do resíduo à população microbiana (MORELLI et al., 1995; CASARINI; CUNHA; SATO, 1991), parecem ser os principais fatores que melhor otimizam o processo de biodegradação da borra oleosa no sistema *landfarming* (CARVALHO; ALMEIDA; FALKIEWICKS, 1995).

### 3.5.2 Bioreatores e lavagem de solos contaminados

Estes métodos são geralmente utilizados em conjunto quando são necessários a escavação e tratamento de solos contaminados ou escombros contaminados de calhas, concretos, tijolos. Possuem a vantagem de atuarem diretamente no poluente e reduzir consideravelmente o volume a ser tratado. No processo de lavagem, a água residual carrega partículas finas e contaminantes, incluindo-se ou não algum tipo de tratamento biológico nesta água (NASH; TRAVER, 1989).

Hoje, existem alguns fabricantes de equipamentos para o manejo e tratamento de solo contaminado.

### 3.5.3 Compostagem

A compostagem é tradicionalmente utilizada na agricultura. Palhadas, matérias verdes e resíduos de alimentos são transformados, por microrganismos, em matéria orgânica para adubação de hortas e canteiros.

Entretanto, também é um método de tratamento de resíduos perigosos e pode ser aplicado para reduzir grandes volumes, como lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto e lixo municipal. A compostagem de solo tem sido usada para degradar materiais explosivos e hidrocarbonetos (PRESON, 1996; CRAIG; WAKEMAN; CHANNELL, 1996; BREITUNG et al., 1996; CRAWFORD; JOHNSON; GOETZ, 1993) e solos contaminados com preservantes de madeira e serragens (LINE, 1995; FERMOR, 1993; FRANKOS; GOUIN; SIKORA, 1982). O aspecto negativo da compostagem é a formação de resíduos tóxicos, líquidos ou gasosos, além da presença de microrganismos entéricos, quando usada na agricultura (STRATTON et al. 1995; SHUVAL et al.

1991).

#### 3.5.4 Método de manejo das águas subterrâneas (*pump and treat*)

Este método consiste em bombear a água infiltrada no solo e tratá-la, adicionando também água na superfície do solo para provê-lo de oxigênio e nutrientes. O solo é praticamente lavado constantemente. *Pump and treat* é indicado quando o contaminante é solúvel em água e o lençol de água subterrânea é pouco profundo em relação à superfície do solo. Quando o contaminante se trata de um produto não miscível em água, geralmente adicionam-se compostos surfatantes para auxiliar na dissolução e eficiência do tratamento (GANDHI; ERICKSON; FAN, 1996; KIMBALL, 1994)

#### 3.5.5 Ventilação do solo (*bioventing*)

Ao contrário do método *pump and treat*, a ventilação do solo é indicada quando o lençol de água subterrânea é profundo e o contaminante é pouco ou insolúvel em água. Neste método, o ar é retirado através de exaustores ou injetado através de ventiladores, facilitando a remoção de compostos voláteis e promovendo a aeração para a biodegradação aeróbia. A desvantagem do *bioventing* é a perda de umidade do solo e a toxidez dos gases aspirados pelos exaustores, além de requerer tratamento complementar de incineração (GRUIZ; KRISTON, 1995).

Cabe salientar que em cada caso de contaminação do solo, acidental ou provocada, as soluções para a remediação são particulares. Muitas vezes o melhor método é a combinação ou modificação das técnicas citadas.

### 3.6 TEMPO DE BIORREMEDIAÇÃO

A estimativa do tempo de biorremediação é complexa e de difícil obtenção, geralmente é estimada a demanda de oxigênio consumida pela população microbiana do solo. O termo meia vida de degradação é empregado para expressar o tempo em que 50% do composto é degradado. O

aumento da quantidade de CO<sub>2</sub> eliminado pela população microbiana indica a multiplicação de bactérias, fungos e actinomicetos (VANDECAVEYE, 1939). Este aumento na atividade respiratória sugere que o composto orgânico está em processo de degradação.

Geralmente é feito o monitoramento da quantidade de contaminante no solo para estimar a eficiência e o estado de biodegradação do resíduo. Entretanto, a formação de compostos intermediários pode influenciar na determinação do estado de degradação do resíduo.

DIBBLE; BARTHA (1979b) verificaram a completa descontaminação de uma área de 15 ha após o derrame de 1,9 milhões de litros de querosene, utilizando calcário, fertilizações e freqüentes arações.

### 3.7 FITORREMEDIAÇÃO

#### 3.7.1 Histórico e aspectos gerais

A utilização de plantas para descontaminação do ambiente não é recente. O primeiro sistema de tratamento de esgoto municipal utilizava plantas aquáticas para a limpeza da água (HARTMAN, 1975<sup>4</sup> citado por CUNNINGHAM et al., 1996). A fitorremediação é mais amplamente documentada na bibliografia como parte do tratamento secundário de estações de tratamento de águas residuais e como recuperadora da qualidade do ar.

Porém, as pesquisas sobre a utilização de plantas no processo de descontaminação de solos, vêm sendo incentivadas, principalmente devido à maior viabilidade econômica, quando comparada aos outros métodos de tratamento de resíduos sólidos. Muito embora o custo de um tratamento para descontaminação do solo dependa das características e da quantidade do poluente, estima-se que, para o tratamento de 1 ha de solo, a fitorremediação custe três vezes menos que um

tratamento biológico *in situ* (CUNNINGHAM et al, 1996) e cerca de 24 vezes menos, quando utilizados bioreatores e lavagem do solo (BERTI, 1996). Este último autor, em seu levantamento de custos para remediar uma área de 10 acres, estimou em U\$12 milhões para a retirada do solo contaminado e posterior tratamento utilizando técnicas de solidificação e estabilização do solo, U\$ 6 milhões para lavagem do solo, U\$ 600.000 para capeamento do solo e U\$ 250.000 utilizando a fitorremediação.

### 3.7.2 Processos da fitorremediação

No processo de remediação de solos contaminados com compostos orgânicos e inorgânicos, algumas espécies de plantas possuem a habilidade de reter ou biovolatilizar o contaminante (BROOKS; BROOKS 1998), bem como a capacidade de “bombear” o contaminante e removê-lo do solo (*phytodecontamination*) ou imobilizá-lo (*phytostabilization*) (ROCK, 1996).

Na fitodescontaminação (figura 1), ocorre a diminuição da concentração do poluente, atingindo níveis aceitáveis. Neste processo, as plantas possuem os seguintes modos de ação:

1. Fitoextração: consiste na absorção do contaminante e subsequente colheita da planta. FLATHMANN; LANZA (1998) discutem casos que utilizam a fitoextração e fitovolatilização de selênio contaminante de solos do oeste da Califórnia.
2. Fitovolatilização: a planta, associada à população microbiana, auxilia na volatilização do contaminante. BROOKS; BROOKS (1998), avaliaram a fitovolatilização do mercúrio, arsênico e selênio de uma área contaminada com estes metais.
3. Fitodegradação: a planta absorve e metaboliza o contaminante em subprodutos não tóxicos.
4. Rizodegradação: a raiz da planta, associada à sua população microbiana, degrada o contaminante na rizosfera.

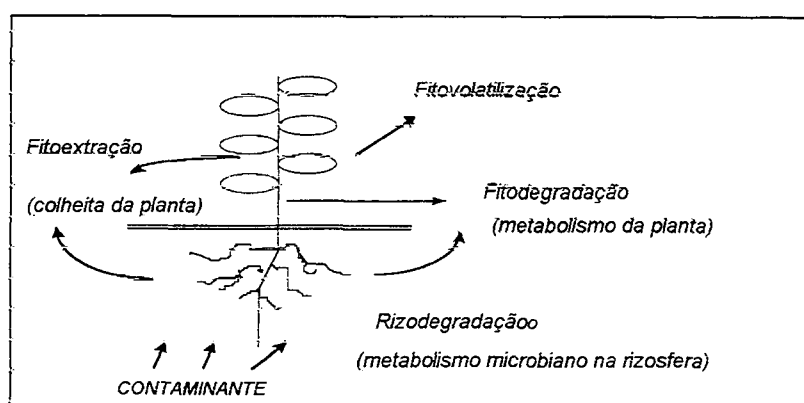
A fitoestabilização (figura 2) imobiliza o contaminante do solo, através da indisponibilidade



à população microbiana e imobilidade no solo. Este processo ocorre naturalmente e é amplamente estudado:

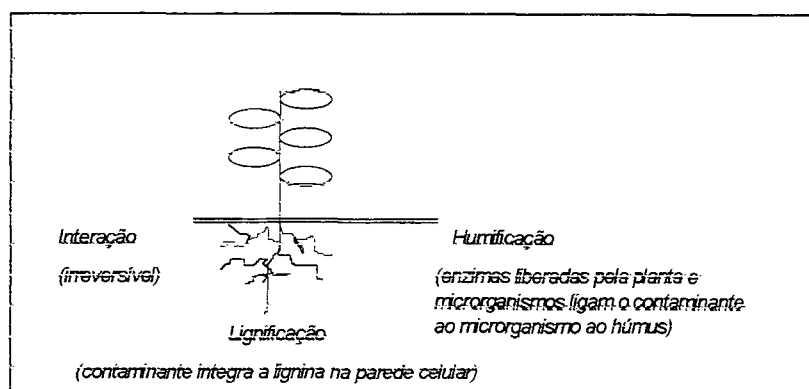
1. Humificação: incorporação do contaminante no húmus do solo.
2. Lignificação: o contaminante torna-se irreversivelmente um constituinte da célula vegetal.
3. Ligação irreversível: o contaminante é irreversivelmente ligado ao solo.

FIGURA 1 - PROCESSO NATURAL DE FITODESCONTAMINAÇÃO DO SOLO PELAS PLANTAS



FONTE : CUNNINGHAM et al. (1996), com modificações.

FIGURA 2 - PROCESSO NATURAL DE FITOESTABILIZAÇÃO DE CONTAMINANTES DO SOLO



FONTE : CUNNINGHAM et al. (1996), com modificações.

### 3.7.3 Rizosfera

A rizosfera é o volume de solo influenciado pelas raízes das plantas (ALEXANDER, 1980). Este sistema solo-planta é reconhecidamente capaz de absorver e transformar compostos orgânicos, incluindo halogenados e hidrocarbonetos poliaromáticos. Também é capaz de hiperacumular metais pesados nas raízes das plantas.

A presença dos compostos orgânicos na rizosfera estimula o desenvolvimento de microrganismos que degradam estas substâncias, promovendo até certo ponto, uma proteção à planta contra os efeitos tóxicos destes compostos. Esta ação da rizosfera é comprovada principalmente em estudos com herbicidas. JACOBSEN (1997), investigou a população de *Burkholderia cepacia* (antes denominada de *Pseudomonas cepacia*) na rizosfera de cevada (*Hordeum vulgare*) e observou em ambiente controlado, o aumento desta bactéria quando submeteu o solo a níveis crescentes de 2,4 D.

A flora microbiana na rizosfera é afetada por vários fatores. A proximidade da amostragem do solo com a raiz é importante. A quantidade de bactérias aumenta com a proximidade da superfície radicial, em consequência disso, o conteúdo de CO<sub>2</sub> próximo à raiz é maior, mas, por outro lado, a população microbiana diminui com a profundidade do solo.

### 3.7.4 Vantagens da fitorremediação

Como visto anteriormente na seção 3.7.1, o fator econômico parece ser o maior incentivador para a utilização da fitorremediação (ROCK, 1996; BERTI, 1996; CUNNINGHAM et al., 1996).

Considerando que este método utiliza a capacidade do ambiente de se auto restaurar, as restrições na legislação e a oposição da população são quase inexistentes. Esteticamente, é o melhor método de biorremediação e tem melhor aceitação visual que os biofiltros ou projetos de biodegradação convencionais (GATLIFF, 1994).

biodegradação convencionais (GATLIFF, 1994).

A presença e as condições das plantas são facilmente monitoradas, ao contrário de um sistema que utiliza unicamente a população microbiana do solo. Esta facilidade de avaliação das plantas viabiliza a utilização do melhoramento genético vegetal na remediação de solos contaminados que, futuramente, tende a tornar-se um recurso promissor (CUNNINGHAM et al., 1996).

Sabe-se que até certo ponto, o tamanho e a atividade da população microbiana são diretamente proporcionais à temperatura (ALEXANDER, 1980; DIBBLE; BARTHA, 1979b). Entretanto, em locais de clima frio ou durante as estações frias do ano, as plantas tolerantes à baixas temperaturas podem incrementar a capacidade de degradação de compostos orgânicos do solo. Foi o que verificou ROGERS et al. (1996) em seu experimento de campo em que utilizou plantas gramíneas e leguminosas, observou uma maior taxa de degradação de químicos orgânicos a 10°C do que a 20°C, provavelmente devido aos compostos mais voláteis, que devido a esta propriedade química, são mais fitotóxicos às sementes e plantas jovens (BOSSERT; BARTHA, 1984; CUNNINGHAM et al., 1996).

#### 3.7.5 Limitações de uso

As principais limitações para utilização da fitorremediação são citadas por alguns autores (McCUTCHEON, 1996; CUNNINGHAM et al., 1996; CUNNINGHAM; OW, 1996; BROWN, 1995) e consistem no tempo de degradação do contaminante até níveis aceitáveis, baixa profundidade do lençol freático, podendo proporcionar a falta de oxigênio às raízes das plantas, textura do solo e condições ambientais desfavoráveis. A baixa biodisponibilidade, a heterogeneidade dos contaminantes no sítio, bem como a complexidade do composto quanto à baixa ou alta capacidade de adsorção, também diminuem a eficiência de ação e restringem a capacidade de descontaminação pelas plantas.

A vegetação envolvida na fitorremediação, quando pastoreada por animais e insetos que fazem parte de uma cadeia alimentar, pode conter um excesso de metais ou metabólicos do

contaminante, constituindo-se num problema sanitário que é agravado pelo desconhecimento de uma regulamentação para utilização de plantas no processo de descontaminação do solo (McCUTCHEON, 1996).

#### 3.7.6 Seleção de espécies

O processo da fitorremediação do solo deve focar essencialmente a dissipação do contaminante através da biomassa radicial e aérea, bem como o aumento da atividade microbiana para promover a degradação e bioacumular o poluente do solo. Portanto, pode-se utilizar a morfologia da raiz como critério para escolha de espécies (KELLER et al. 1996).

Alta densidade radicial e raízes profundas são características favoráveis para a fitorremediação. Compostos com alta solubilidade podem ser absorvidos por espécies arbóreas que podem controlar o nível do lençol freático, como o *Populus* e eucalipto (BURKEN; SCHNOOR, 1997; THOMPSON; RAMER; SCHNOOR, 1998; WOODWARD, 1996; FLATHMANN; LANZA 1998). As espécies forrageiras são mais documentadas para a cobertura e descontaminação de solos e ao contrário de plantios com finalidades comerciais, não visam alta produção de grãos. Soja (*Glycine max*) (PRADO; LÓPEZ; BOISSIERE, 1995; CARR, 1919), trigo (*Triticum aestivum*) (DIBBLE; BARTHA, 1979b), aveia (*Avena sativa*) (EBBS; KOCHIAN, 1998) são espécies freqüentemente citadas na literatura para utilização na fitorremediação.

As plantas devem estar adaptadas aos fatores físicos e ambientais da região, como a cota de elevação do local, regime de chuvas e média de temperatura (ROGERS et al., 1996). A fisiologia da espécie quanto à fotossíntese também cabe observar. Plantas com sistema fotossintético C<sub>3</sub> podem ser mais resistentes à seca e ao calor quando comparadas com plantas C<sub>4</sub> (CUNNINGHAM; ANDERSON; SCHWAB et al., 1996).

Testes de fitotoxicidade das espécies aos contaminantes são convenientes antes da implantação do processo de fitorremediação. Geralmente, a porcentagem de germinação, desenvolvimento vegetativo e são considerados (PAULINO, 1996; NASCIMENTO NETO, 1996; BAUD GRASSET, F; BAUD GRASSET, S; SAFFEMAN, 1993).

Alguns trabalhos destacam a utilização de leguminosas que, através da simbiose com bactérias nitrificantes, auxiliam seu próprio conteúdo de nitrogênio. Geralmente, este nutriente é um fator limitante devido à rápida mineralização de compostos orgânicos (CARR, 1919; PRADO; LÓPEZ; BOISSIERE, 1995; GUDIN; SYRATT, 1975).

As espécies *Acacia nilotica* (L.) Del e *Casuarina equisetifolia* Forst. foram testadas em relação à tolerância de efluentes contendo fenol, anilina e violeta metil. KANEKAR et al. (1993) observou alta sobrevivência das duas espécies (100 e 87%) quando submetidas ao efluente não tratado química e biologicamente.

A utilização de espécies florestais, para descontaminação de solos, vem complementar as pesquisas com espécies forrageiras que são pouco eficientes na extração de metais em maiores profundidades do solo. Por outro lado, ENTRY; EMMINGHAM (1996) comprovaram melhor degradação de compostos orgânicos como Atrazina e 2,4 D, nas camadas orgânicas e no solo mineral de coníferas, quando comparado com campos de forrageiras e florestas decíduas. Não existem ainda citados na literatura, trabalhos utilizando a consorciação de plantas arbóreas e forrageiras com a finalidade de descontaminação do solo, mas possivelmente, seja viável esta combinação de espécies, pois cada caso de contaminação do solo têm sua solução peculiar.

### 3.8 PLANTAS BIOACUMULADORAS DE METAIS

Pesquisas vêm mostrando que é viável a descontaminação de solos com altos teores de metais em poucos anos, utilizando-se de manejos agronômicos adequados, resultados de experiências anteriores com diferentes espécies, bem como favorecendo a disponibilização dos metais na solução do solo (ERNST et al., 1996).

Plantas que acumulam metais até cerca de 1 a 3% de seu peso seco, podem ser consideradas como hiperacumuladoras e possuem potencialidade em relação à extração de metais pesados em solos contaminados (CUNNINGHAM; OW, 1996).

A toxidez por metais pesados nas plantas é causada pelo excesso destes metais que estão disponíveis no solo. A figura 3 mostra os principais sintomas causados pelo excesso destes elementos nas plantas (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1985).

Espécies de árvores como *Betula* sp., *Alnus* sp., *Salix* sp. são tolerantes aos metais e possuem potencialidades para descontaminar áreas poluídas por indústrias. A aplicação desta técnica ainda é restringida pelo conhecimento somente parcial dos efeitos dos metais no ecossistema (GLIMMERVEEN, 1996).

### 3.8.1 Essencialidade dos elementos inorgânicos

Os critérios de essencialidade foram estabelecidos por ARNON; STOUT (1939) e reafirmados por (EPSTEIN, 1975), que sugerem como essencial direto, o elemento que faz parte de um composto ou participa de uma reação crucial para o metabolismo. Também foi considerado essencial de forma indireta, o elemento que, ausente, não permite à planta completar seu ciclo de vida, apresentando sintomas de carência e morrendo.

No grupo dos metais pesados, MALAVOLTA (1994) apresenta como essenciais o Cu, Fe, Mn, Mo, Zn. Como benéficos o Co, Ni e V. Não essenciais ou sem função o Al, Cd, Cr, Hg, Pb. Os elementos do grupo dos essenciais e benéficos, possuem cada qual a sua função, portanto, podem também ser considerados como micronutrientes.

Após a adoção de meios nutritivos como técnica experimental, verificou-se que as plantas não se desenvolviam sem os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S e Fe. Foram, então, denominados de macronutrientes, pois são exigidos em quantidades relativamente altas. Na medida em que foram desenvolvendo-se as pesquisas dentro da nutrição de plantas, novos elementos foram sendo incorporados na lista dos essenciais. Entretanto, como as quantidades exigidas pelas plantas eram

muito inferiores aos dos macronutrientes, foram então chamados de micronutrientes (EPSTEIN, 1975).

Crítérios como o acúmulo destes elementos nos tecidos vegetais, sintomas visíveis de toxidez e diminuição na produção da massa seca são utilizados para caracterizar o estado de toxidez ou carência causado por um determinado elemento ou associação deles.

### 3.8.2 Alguns macronutrientes e micronutrientes estudados

Para melhor entendimento na interpretação dos resultados das análises dos teores de macronutrientes e micronutrientes, convém caracterizar alguns elementos estudados.

O potássio está presente no solo na forma solúvel, trocável, fixado na rede cristalina e incorporado à matéria orgânica. Os principais minerais que tem o elemento como parte dessa rede cristalina são feldspatos, micas e argilas micáceas. A importância prática está nas características físico-químicas do mineral de origem em fixar o potássio e na capacidade das plantas de promover sua solubilização, visto que a absorção do nutriente na forma solúvel desencadeia o processo de libertação de parte do potássio fixado (MALAVOLTA, 1980). A textura do solo também é um dos principais fatores que influenciam a disponibilidade do potássio. Solos argilosos geralmente possuem maiores reservas disponíveis do que em solos arenosos (MENGEL; KIRKBY, 1975).

O potássio é intensamente exigido pelas plantas, possui alta mobilidade tanto no solo como no interior dos tecidos vegetais. MENGEL; KIRKBY (1975) sugerem que dentre os macronutrientes o potássio é o único que pode ser absorvido com um gradiente eletroquímico negativo. Usualmente o potássio solúvel é menor que as exigências das plantas, tornando ambas frações trocável e incorporada à matéria orgânica, como sendo de grande importância no suprimento nutricional (MALAVOLTA, 1980).

Os microrganismos podem solubilizar o potássio através da mineralização da matéria orgânica, principalmente através da síntese de ácidos orgânicos. Espécies como *Bacillus* e

*Pseudomonas*, entre as bactérias, e *Aspergillus*, *Mucor* e *Penicillium*, entre os fungos, são os principais microrganismos que incorporam o potássio na sua biomassa (ALEXANDER, 1980).

Nas plantas as principais funções do potássio são de ativação enzimática, síntese protéica, fixação do CO<sub>2</sub> durante o processo fotossintético, promoção do potencial osmótico responsável pelo turgor, balanço hídrico, transporte floemático e movimentos estomáticos (MARSCHNER, 1993a).

O magnésio no solo têm o mesmo comportamento que o potássio quanto à disponibilidade. Pode estar nas fases disponível, não disponível ou em solução. A maior fração está na forma indisponível, fazendo parte dos minerais primários (piroxênios, anfibólios, olivina, turmalina, muscovita e biotita) e secundários (montmorilonita, illita, clorita, vermiculita) (MENGEL; KIRKBY, 1975).

Na planta geralmente ocupa 0,5% da massa seca e sua absorção geralmente é menor que a do cálcio e potássio. Assemelha-se ao cálcio quando se acumula em altos níveis principalmente nas folhas mais velhas e, ao contrário deste, é móvel através do floema (MENGEL; KIRKBY, 1975).

A função bioquímica mais conhecida do magnésio é a formação de moléculas de clorofila. Entretanto, somente 15 a 20% do conteúdo total de magnésio na planta é envolvido neste processo. É também o principal cofator da maioria das enzimas que atuam no processo de fosforilação, bem como ativação das enzimas dehidrogenases no ciclo do ácido tricarboxílico. Tratando-se de um elemento promotor da síntese protéica, a carência do magnésio na solução do solo diminui a proporção do nitrogênio protéico e aumenta o nitrogênio não protéico na planta. A queda prematura de folhas e necrose internerval nas folhas mais velhas, geralmente são sintomas de deficiência deste nutriente (MENGEL; KIRKBY, 1975).

A principal relação com outro nutriente é a proporção de magnésio e potássio solúveis. Altos níveis de potássio podem restringir a absorção do magnésio, o mesmo acontece com altos teores de amônia no solo. O teor de magnésio na solução do solo, em geral, está entre o cálcio e o potássio (MALAVOLTA, 1976).



O cálcio no solo pode estar nas formas de carbonatos (metamórficos ou sedimentares) sulfatos e silicatos, os últimos em altos teores nos minerais primários como anortita, augita, ipidoto e apatita e teores mais baixos nos minerais secundários (MALAVOLTA, 1980).

Na planta é mais acumulado nas raízes do que nas partes aéreas, quando acumula-se nas folhas mais velhas e, pelo fato de possuir baixa translocação no floema, dificilmente é translocado para tecidos meristemáticos. Esta baixa mobilidade na planta tem razão ainda desconhecida, mas, supõe-se que o cálcio precipita-se no floema na forma de fosfato de cálcio (MENGEL; KIRKBY, 1975).

O cálcio tem função estrutural importante pois compõe a lamela média da parede celular na forma de pectato de cálcio. Este fato somado a dificuldade de translocação justifica sua importância no processo de divisão e alongamento das células das raízes (MENGEL; KIRKBY, 1975; MALAVOLTA, 1980). Nas folhas, MARSCHNER (1993a), comenta a importância do oxalato de cálcio para a resistência contra infecção fúngica.

MARSCHNER, (1993a) e MENGEL; KIRKBY (1975) citam o cálcio como um dos responsáveis pela variação na permeabilidade da membrana celular que é causada pela troca de cálcio da célula pelo excesso de hidrogênio livre do meio. De certa forma, o cálcio afeta a difusão de compostos no tecido vegetal. Os mesmos autores também citam a influência do nutriente na germinação e crescimento do pólen, bem como na formação e desenvolvimento de nódulos de *Rhizobium*. Os principais sintomas visíveis de deficiência são amarelecimento das margens das folhas, crescimento não uniforme da folha, murcha e morte das gemas terminais (MALAVOLTA, 1976).

A principal fonte de ferro estão nos minerais primários que formam óxido (hematitas, ilmenitas, magnetitas). Nas rochas sedimentares os óxidos de ferro e sideritas são as formas mais comuns para o ferro. O conteúdo de ferro solúvel é extremamente baixo comparando-se com a forma total. As formas solúveis inorgânicas incluem  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Fe(OH)}^{+2}$ ,  $\text{Fe(OH)}^{+2}$ , e  $\text{Fe}^{+2}$ . A oxidação do Fe no solo tem importância na prevenção da toxidez deste elemento, como por exemplo o bronzeamento do arroz causado pela redução do  $\text{Fe}^{+3}$  para  $\text{Fe}^{+2}$  que ocorre em solos encharcados

(MENGEL; KIRKBY, 1975). Cabe salientar que os sintomas de deficiência do ferro são causados principalmente pela diminuição da disponibilidade ou da absorção, e não pela falta propriamente dita deste elemento (MALAVOLTA, 1980).

O ferro está presente em basicamente dois grupos de proteínas: hemoproteínas e ferro-sulfo proteínas. As primeiras são representadas pelos citocromos, citocromos oxidases, catalase, peroxidase e leghemoglobina. Os citocromos são constituintes do sistema de reações de redox nos cloroplastos e mitocôndrias e quando está na forma de citocromo oxidase, participa da fase terminal da cadeia respiratória da planta. Já as catalases facilitam a dissociação da água oxigenada em água e oxigênio durante a fotorespiração e a via glicolítica. As peroxidases são abundantes na rizoderme e endoderme das raízes e catalizam a polimerização de compostos fenólicos em lignina (MARSCHNER, 1993a). Fato comum em solos ácidos é a indisponibilidade do ferro devido a aplicação excessiva de calcário, causando clorose nas plantas (MENGEL; KIRKBY, 1975), assim como o excesso de fósforo pode causar a precipitação do ferro na planta (MARSCHNER, 1993a).

O cobre no solo está quase que exclusivamente na forma divalente ( $\text{Cu}^{+2}$ ) e é facilmente complexada com compostos de baixo peso molecular. Nas raízes e no xilema mais de 99% do cobre é complexado em aminoácidos e outros compostos. SANDMANN; BÖGER (1983)<sup>5</sup> citados por MARSCHNER (1993a) mencionaram o cobre em três diferentes formas nas proteínas: proteínas azuis, proteínas não azuis e proteínas multicúpricas. As primeiras, segundo esses autores, não tem atividade da oxidase, como por exemplo a plastocianina. As proteínas não azuis produzem peroxidase e oxidam monofenóis para difenóis. As multicúpricas contém no mínimo quatro átomos de cobre para cada molécula e atuam como oxidases e catalizam reações, são exemplos as oxidases ascorbate e lacases. Além das funções enzimáticas de catálise, MALAVOLTA (1980) e MARSCHNER (1993a) destacam a influência do cobre na síntese de proteínas, metabolismo de carboidratos e na fixação simbiótica do nitrogênio. O último autor cita ainda a importância do cobre na lignificação e formação da parede celular, bem como a formação e fertilização do pólen. Segundo

---

<sup>5</sup>SANDMANN, G.; BÖGER, P. The enzymatological function of heavy metals and their role in electron transfer processes of plants. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. *Encyclopedia of plant physiology*, Berlim : v. 15<sup>a</sup>, p. 563-596. 1983.

HODENBERG; FINCK (1975)<sup>6</sup> e ROBSON; REUTER (1981)<sup>7</sup> citados por MARSCHNER (1993a) níveis superiores a 20 µg/g de cobre na massa seca das folhas, podem apresentar toxicidade. Por sua vez, cabe salientar que o nível de tolerância é variável para qualquer elemento nas diferentes espécies de plantas. Quando tolerantes, as plantas acumulam altos teores de cobre nas raízes, já aquelas não tolerantes, é inibido o crescimento radicial ou ocorrem doenças radiciais (WAINWRIGHT; WOOLHOUSE, 1977<sup>8</sup>; citado por MARSCHNER, 1993a).

O zinco é um componente de várias enzimas, inclusive as desidrogenases como a do álcool e ácido láctico. A interação mais conhecida é a deficiência de zinco induzida pelo excesso de fósforo ou fosfato (EPSTEIN, 1975). Também é responsável pela síntese do triptofano que é precursor do ácido indolacético, um hormônio de crescimento das plantas, embora esta função seja contestada por TAKAKI; KUSHIZAKI (1970)<sup>9</sup>, citados por EPSTEIN (1975). A carência do zinco também provoca a diminuição fotossintética e da síntese protéica (EPSTEIN, 1975). Os sintomas visíveis de deficiência são: diminuição no tamanho dos internódios com formação de tufos terminais nas folhas, folhas novas pequenas, estreitas e alongadas (MARSCHNER, 1993a).

O sódio é abundante nos solos e mais fracamente adsorvidos pelos colóides do que o potássio, magnésio e cálcio. Em solos salinos, onde existe o excesso de sódio, a qualidade e manejo das águas são importantes no processo de dessalinização, já que este elemento têm fácil dissolução. Entretanto, as plantas podem excluir o sódio no processo de absorção, enquanto outras são capazes

---

<sup>6</sup> HODENBERG, A. V. A.; FINCK, A. Ermittlung von toxisitäts-grenzwerten für zink, kupfer und blei in hafer und rotkeel. z. **Pflanzener naehr bodenk**, v. 138, p. 489-503, 1975.

<sup>7</sup> ROBSON, A. D.; REUTER, D. J. Diagnosis of copper deficiency and toxicity. In: LONERAGAN, J. F.; ROBSON, A. D.; GRAHAM, R. D. **Copper in soils and plants**, London : Academic Press, p. 287-312. 1981.

<sup>8</sup> WAINWRIGHT, S. J.; WOOLHOUSE, H. W. Some physiological aspects of copper and zinc tolerance in *Agrostis tenuis* sibth: cell elongation and membrane damage. **J. exp. bot.**, n. 28, p. 1029-1036. 1977.

<sup>9</sup> TAKAKI, H.; KUSHIZAKI, M. Accumulation of free tryptophan and tryptamine in zinc deficient maize seedlings. **Plant and Cell Physiol**, v. 11, p. 793-804, 1970.

de acumular no tecido vegetal. As funções são pouco conhecidas, mas sabe-se que é ativador de algumas enzimas (MARSCHNER, 1993a).

### 3.8.3 Plantas hiperacumuladoras

As plantas capazes de extrair altos níveis de metais são chamadas de hiperacumuladoras (BROOKS et al., 1977) e, para tomarem-se funcionais na fitoextração de metais, estas plantas devem produzir altos conteúdos de biomassa e facilidade de translocação dos metais (CUNNINGHAM; OW, 1996). A existência destas plantas vem causando considerável interesse na área ambiental para descontaminação de solos, como também na atividade de mineração comercial. É possível a associação das plantas com a presença dos metais no solo (BENNETT et al., 1998; BROOKS R. R.; BROOKS R. R., 1998).

Algumas espécies de plantas forrageiras e arbóreas vêm sendo catalogadas como grandes extratoras de metais do solo. Muitas vezes, as plantas que possuem esta habilidade, não desenvolvem-se, por razões ainda desconhecidas, em áreas que não estejam severamente contaminadas. Por esta razão, são comumente chamadas de *metalófitas* (COMIS, 1992). Possivelmente estas plantas sejam naturalmente tolerantes a estes ambientes, como as plantas que se desenvolvem em solos extremamente ácidos ou básicos. Essencialmente, essa tolerância é explicada por três mecanismos que ocorrem na planta: limitação na absorção do metal, compartimentação do metal e desintoxicação bioquímica (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1985). BAKER et al. (1983) demonstraram a habilidade de tolerância do gênero *Silene* L. (Caryophyllaceae) ao excesso de cobre e cobalto através da exclusão seletiva destes metais no processo de absorção. A tabela 3 mostra algumas destas espécies caracterizadas como hiperacumuladoras de metais.

TABELA 3 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS (base seca) EM ESPÉCIES CONSIDERADAS HIPERACUMULADORAS

METAL	ESPÉCIES	TEORES (mg/kg na base seca)
Cd	<i>Thlaspi caerulenscens</i>	1800 <sup>(a)</sup>
Cu	<i>Ipomoea alpina</i>	12300 <sup>(a)</sup>
Co	<i>Haumaniastrum robertii</i>	10200 <sup>(a)</sup>
Pb	<i>Thlaspi rotundifolium</i>	8200 <sup>(a)</sup>
Mn	<i>Macadamia neurophylla</i>	51800 <sup>(a)</sup>
Ni	<i>Psychotria douarrei</i>	47500 <sup>(a)</sup>
	<i>Sebertia acuminata</i>	11% (p. úmido da seiva) <sup>(b)</sup>
Zn	<i>Thlaspi caerulenscens</i>	51600 <sup>(c)</sup>

FONTE: CUNNINGHAM; OW (1996) com dados utilizados de <sup>(a)</sup> BAKER; WALKER (1990), <sup>(b)</sup> JAFFRÉ et al. (1994), <sup>(c)</sup> BROWN et al. (1994).

A *Sebertia acuminata* Pierre ex Baill (Sapotaceae), uma árvore com cerca de 10 metros de altura e nativa de New Caledonia, destaca-se por acumular cerca 11,2% (base úmida) ou 25,74% (base seca) de Ni em seu látex (JAFFRÉ et al., 1976). O gênero *Thlaspi* sp. vêm mostrando grande aptidão natural para acumular metais nas espécies *T. caerulenscens* para Zn e Cd (CUNNINGHAM; OW, 1996), *T. rotundifolium* para Pb (CUNNINGHAM; OW, 1996), *T. goesingense* e *T. arvense* para Ni (KRAMER et al., 1997).

### 3.9 SINTOMAS DE TOXIDEZ CAUSADO POR METAIS PESADOS

O efeito dos contaminantes nas plantas, muitas vezes, é utilizado como critério de avaliação da poluição causada por suas fontes. Alguns trabalhos sugerem a utilização de árvores como bioindicadoras de elementos poluentes do solo, ar ou águas subterrâneas.

Encontram-se amplamente registrados na literatura, estudos dos efeitos do SO<sub>2</sub> e CO nas emissões gasosas de indústrias e queimas de combustíveis. Estes compostos promovem a formação de chuva ácida e aumento dos níveis de CO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> na atmosfera. Espécies como *Picea rubens* Sarg. (EDWARDS; KELLY; SHERMAN, 1995; MENG et al. 1995) e *Pinus taeda* L. (EDWARDS; KELLY; SHERMAN, 1995), *Picea abies* (EKEBERG; JABLONSKA; OGNER, 1995) servem como

bioindicadores destes poluentes através de análises químicas nos tecidos, taxas respiratórias e sintomas visíveis.

O surgimento de necroses e cloroses, diminuição da clorofila, redução no crescimento e produtividade da massa seca podem estar associados a altos teores de metais pesados no substrato (ALI, 1993). Quando não são visíveis os sintomas causados pelo excesso desses metais, sua presença pode ser determinada através das análises químicas dos tecidos.

FIGURA 3 - PRINCIPAIS SINTOMAS DE TOXIDEZ DE METAIS PESADOS NAS PLANTAS

ELEMENTOS	SINTOMAS
Cd	Folhas com margens pardas, clorose, pecíolos e nervuras avermelhadas. Enrolamento das folhas. Raízes pardas e curtas.
Co	Clorose de ferro induzida nas folhas novas, pontas e margens esbranquiçadas. Pontas das raízes danificadas.
Cr	Clorose nas folhas mais novas. Raízes mal desenvolvidas.
Cu	Folhas inicialmente verde escuras, depois clorose em manchas aquosas que secam e podem ficar quase negras. Desfolhamento, raízes mal desenvolvidas. Mau perfilhamento em cereais.
Fe	Folhas verde escuras. Redução no crescimento da parte aérea e das raízes. Folhas podem ficar bronzeadas a avermelhadas.
Mn	Amarelecimento ou cor parda das folhas. Menor perfilhamento dos cereais e raízes mal desenvolvidas.
Pb	Folhas verde escuras, murchamento das folhas mais velhas. Parte aérea e raízes pouco desenvolvidas (e pardas).
Zn	Clorose e bronzeamento das folhas mais novas. Atraso no crescimento. Raízes parecidas com arame farpado.
Ni	Clorose internerval das folhas mais novas ou cor verde cinza. Raízes pardas e curtas.

NOTA: <sup>(a)</sup> KABATA-PENDIAS; PENDIAS (1985), modificado por MALAVOLTA (1994).

### 3.10 ABSORÇÃO, TRANSPORTE E DISTRIBUIÇÃO DE ELEMENTOS NA PLANTA

#### 3.10.1 Absorção pela planta

Qualquer elemento, seja macro ou micronutriente, essencial ou não, faz sempre o mesmo caminho quando é absorvido pelas raízes: parede celular, espaços intercelulares, superfície externa do citoplasma, citoplasma, tonoplasto e vacúolo (MALAVOLTA, 1994).

Metais e micronutrientes são absorvidos geralmente na forma iônica como  $\text{Co}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{HMoO}_4^{-2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+6}$  e  $\text{Pb}^{+2}$ .

Os mecanismos de absorção são ampla e genericamente conhecidos na fisiologia das plantas. Sabe-se que os íons, quer sejam nutrientes ou não, estão sujeitos a dois processos de entrada na planta. Um processo passivo, no qual não há gasto de energia pela planta, e os íons seguem a favor de um gradiente de concentração em que o meio externo é mais saturado ionicamente do que os espaços intercelulares e parede celular. No mecanismo passivo, são implicados alguns processos de movimentação dos íons na solução, como a difusão (movimento do íon numa fase aquosa estacionária) e fluxo de massa (movimento do íon numa fase aquosa móvel), adsorção (concentração do íon na superfície da parede celular), equilíbrio de Donnan (caminhamento do íon para a parede até que as concentrações externa e interna se equalizem) (MALAVOLTA, 1976).

No processo ativo, o íon movimenta-se para uma fase aquosa com maior concentração iônica. Neste processo, estão envolvidos mecanismos ainda não bem entendidos, pois sabe-se que a parede celular possui características impermeáveis aos íons, entretanto, ocorre necessariamente a entrada destes nutrientes no interior da célula (MALAVOLTA, 1976). A hipótese mais divulgada e aceita é a dos carregadores que formam complexos permeáveis à membrana e transportam os íons ao interior da célula. EPSTEIN (1975) mostra detalhadamente os mecanismos de absorção iônica e os fatores que modificam a absorção e transporte dos elementos inorgânicos pelas raízes.

### 3.10.2 Transporte e redistribuição

O transporte radial dos elementos inorgânicos na planta segue o caminho: epiderme, parênquima cortical, endoderme e cilindro central.

Radialmente, os íons passam de uma célula a outra via protoplasma e seus prolongamentos (plasmodesmos). As estrias de Caspari impedem a travessia apoplástica da endoderme, forçando o caminho simplástico. A partir da endoderme, os íons seguem pelas vias simplástica e apoplástica. (MALAVOLTA, 1976).

O deslocamento dos elementos inorgânicos, das raízes até as partes aéreas, é feito através do xilema e distribuem-se por vasos floemáticos por toda a planta. Os metais pesados encontram-se no xilema na forma iônica ( $\text{Cr}^{+2}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_4^{-2}$ ,  $\text{Co}^{+2}$ ), complexado ou quelatizado: Cu-aminoácidos, Fe-citrato, Mo-aminoácidos com S, Ni-aminoácidos. (MALAVOLTA, 1994).



## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 LOCALIZAÇÃO

A área experimental situa-se no interior do pátio industrial da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR), pertencente à PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S.A., no município de Araucária, região metropolitana de Curitiba, Paraná. As coordenadas geográficas são 25° 35' 21" S e 49° 25' 00" W.

### 4.2 INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO

Foram selecionadas duas áreas experimentais para o estudo, localizadas no Setor de Transferência e Estocagem de Produtos (SETRAE) da REPAR.

#### 4.2.1 Espécies utilizadas

Foram utilizadas mudas de árvores de sete espécies nativas e seis espécies exóticas. As idades das mudas no plantio, variaram de 3 a 22 meses entre as espécies, sendo provenientes de três diferentes viveiros: do Instituto Ambiental do Paraná - IAP, da Secretaria Municipal de Agricultura e Abastecimento de Araucária - SMAG, e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA/CNPFlorestas (figura 4). Este trabalho objetivou testar espécies florestais quanto à sua adaptação às condições do solo modificadas pela adição de resíduos oleosos. Por este motivo optou-se pela utilização do maior número de espécies disponíveis em condições de mudas para plantio, apesar da variação de idade entre espécies.

Adubações químicas e orgânicas foram feitas em todos os viveiros, adicionando-se ao substrato das mudas, com concentrações em torno de 30% de composto orgânico e 1% de N-P-K com teores não determinados para cada nutriente. As mudas das espécies nativas foram produzidas em sacos plásticos de 500 ml e para as espécies exóticas foram utilizados sacos plásticos de 300 ml.

#### 4.2.2 Origem e composição dos resíduos

As borras oleosas aplicadas na área experimental originaram-se da Unidade de Tratamento de Despejos Industriais - UTDI, das canaletas de captação de águas contaminadas, e dos depósitos de armazenamento de borras acumuladas. Na UTDI, utilizaram-se borras das diferentes etapas do processo de tratamento das águas residuais. Neste trabalho, as borras são citadas com a identificação dos tanques ou locais que as originaram: borras do tanque de contenção da UTDI - TQ 63201; tanque de recebimento diário de borras da UTDI - TQ 63209; tanque de equalização do separador de água e óleo (SAO) - TQ 63210; e dos depósitos de borras acumuladas - B 2 e B 3. Cabe salientar que as borras oleosas utilizadas são consideradas de baixos teores de metais pesados. A composição das borras é mostrada na tabela 4.

FIGURA 4 -LISTA DAS ESPÉCIES UTILIZADAS, NATUREZA, VIVEIRO DE PRODUÇÃO E IDADE NO PLANTIO

ESPÉCIES	NATUREZA	VIVEIRO	IDADE
PITANGA [ <i>Eugenia uniflora</i> ]	nativa	IAP	9 meses
ERVA - MATE [ <i>Ilex paraguariensis</i> ]	nativa	SMAG	15 meses
CINAMOMO [ <i>Melia azedarach</i> ]	exótica	SMAG	8 meses
CUPRESSUS [ <i>Cupressus lusitanica</i> ]	exótica	SMAG	14 meses
IPÊ AMARELO [ <i>Tabebuia chrysotricha</i> ]	nativa	SMAG	10 meses
TIPUANA [ <i>Tipuana tipu</i> ]	exótica	SMAG	5 meses
EUCALYPTUS [ <i>Eucalyptus dunnii</i> ]	exótica	IAP	3 meses
BRACATINGA [ <i>Mimosa scabrella</i> ]	nativa	EMBRAPA	4 meses
ACÁCIA NEGRA [ <i>Acacia mearnsii</i> ]	exótica	IAP	3 meses
AROEIRA [ <i>Schinus therebinthifolius</i> ]	nativa	SMAG	11 meses
CANAFÍSTULA [ <i>Peltophorum dubium</i> ]	nativa	SMAG	22 meses
GUABIROBA [ <i>Campomanesia xanthocarpa</i> ]	nativa	SMAG	9 meses
CASUARINA [ <i>Casuarina equisetifolia</i> ]	exótica	EMBRAPA	5 meses

TABELA 4 - COMPOSIÇÃO (%) E CONCENTRAÇÃO (mg/l) DE METAIS DAS BORRAS OLEOSAS

ORIGEM RESÍDUO	COMPOSIÇÃO (%)				CONCENTRAÇÃO DE METAIS (mg/l)								
	água	óleos e graxas	Asfaltenos	sedimentos	Pb	Zn	Cu	Ar	Cr	Fe	Ni	Cd	Hg
TQ63209	89,4	1,1	0,24	9,26	11,9	131,5	11,6	8,4	31,6	2291,0	20,5	-	0,8
TQ63201	81,8	12,45	0,58	5,17	109,0	246,0	43,0	219,0	484,0	4814,0	174,0	8,0	16,0
B2	66,7	9,1	0,4	23,8	59,0	644,8	157,9	161,6	429,5	-	73,1	3,6	4,7
B3	73,2	6,0	0,4	23,8	40,7	313,3	37,0	75,0	667,0	5862,1	44,3	0,8	2,5
TQ63210	11,21	25,05	-	-	9,0	48,0	29,0	12,0	58,0	2976,0	13,0	1,0	1,0

NOTA: Os espaços em branco representam teores não determinados.

#### 4.2.3 Taxa de aplicação dos resíduos

O critério utilizado para a aplicação das borras oleosas no solo foi a quantidade de metal acumulada no solo, conforme a recomendação do EPA-USDA para solos de uso agrícola, norma 800/81 que estabelece parâmetros de acumulação de metais pesados no solo. Nesta norma, o EPA utiliza a capacidade de troca catiônica do solo (CTC) como critério para o acúmulo de metais pesados.

No Brasil, não existe ainda uma regulamentação específica para o teor máximo de metais pesados no solo, mas projetos para tratamento de resíduos no solo necessitam de prévia autorização do órgão ambiental local, mesmo com a instalação no interior de um pátio industrial, onde não serão produzidas plantas para consumo humano ou animal.

Para a coleta das borras, transporte e distribuição na área experimental, foi utilizado um caminhão tipo tanque a vácuo com moto bomba para sucção e descarga, com capacidade de carga de 6 m<sup>3</sup>. Na aplicação, utilizou-se um mangote com diâmetro de 2,5 polegadas, acoplado ao caminhão, e dois operadores para distribuição homogênea e uniforme do material no solo.

A área de biorremediação 4, que agora será referida no trabalho como **área 4**, recebeu 770,52 m<sup>3</sup> de borras oleosas durante 13 meses. Após cada aplicação do resíduo, o solo foi arado sucessivas vezes para a incorporação do material e aeração do sistema. As diferentes origens e quantidades de resíduos aplicados são apresentados na tabela 6.

A área testemunha, adjacente à área 4, e que neste trabalho será referida como **área 4T**, foi somente arada com a finalidade de remoção da vegetação rasteira original e como preparo para o plantio.

TABELA 5 - ACÚMULO MÁXIMO DE METAIS NO SOLO PARA USO AGRÍCOLA (kg/ha)

METAL (kg/ha)	CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA (CTC)		
	< 5	5 a 15	> 15
Chumbo	500	1000	2000
Zinco	250	500	1000
Cobre	125	250	500
Níquel	50	100	200
Cádmio	5	10	20

FONTE : NORMA DA EPA/USDA 800/81

TABELA 6 - ORIGEM, TAXA DE APLICAÇÃO (m<sup>3</sup>) E ACÚMULO DE METAIS (kg/ha) NO SOLO DA ÁREA 4

ORIGEM	(m <sup>3</sup> )	Pb	Zn	Cu	Ar	Cr	Fe	Ni	Cd	Hg
TQ63209	18,14	1,15	12,74	1,124	0,814	3,062	0	1,98	0	0,078
TQ63201	219,8	127,95	288,8	50,48	257,1	568,2	0	204,3	9,39	18,78
B2	163,5	51,53	563,2	137,9	141,1	375,1	0	63,85	3,14	4,10
B3	313,8	68,22	114,2	0	0	1118	9826		1,34	4,19
TQ63210	55,34	2,66	14,19	8,573	3,547	17,15	0	3,84	0,29	0,29
TOTAL	770,52	251,52	993,1	198,1	402,6	2082	9826	273,97	14,17	27,45

#### 4.2.4 Plantio das mudas

O plantio iniciou-se na área 4 dez meses após a última aplicação de borras. Nesse período, conforme as condições físicas do solo, a área foi manejada intensamente com arações para homogeneização e aeração do solo. Na área 4T, após a limpeza da vegetação, executaram-se quatro arações cruzadas e uma gradagem de nivelamento para recebimento das mudas. Todas as arações, tanto para incorporação dos resíduos, como para o preparo do plantio, foram superficiais com 20 a 30 cm de profundidade, utilizando-se arado do tipo reversível com três discos de 26 polegadas de diâmetro. Antecedendo ao plantio das mudas, foi utilizada uma grade de discos para nivelamento do terreno nas duas áreas experimentais.

As mudas foram plantadas num período de 4 semanas, e as dimensões das covas foram de 30 x 30 cm, com espaçamento de 1 m entre plantas. Devido à dificuldade de drenagem do terreno, o plantio foi interrompido quando o solo encontrava-se encharcado, e reiniciado após a infiltração e evaporação da água. Foram efetuadas três capinas durante o período experimental de 918 dias.

#### 4.3 DELINEAMENTO ESTATÍSTICO

Foi utilizado o delineamento estatístico inteiramente casualizado nos experimentos da área 4 e área 4T. O tamanho das parcelas foi de 6 x 6 m com 4 repetições para cada tratamento (13 espécies), totalizando 52 parcelas e 1872 m<sup>2</sup> para cada área experimental. Diante da expectativa inicial de perda de parcelas inteiras, este tipo de delineamento foi considerado o mais adequado (GOMES, 1987). Foi utilizado o *software* STATISTICA versão 5.0 da Microsoft para as análises estatísticas dos ensaios experimentais.

#### 4.4 DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS

As determinações de biomassa, diâmetro do colo, teor de metais pesados, micronutrientes, macronutrientes, atividade microbiana do solo e contagem de fungos e bactérias do solo foram feitas nas parcelas de casuarina, aroeira e ipê. As demais análises e determinações foram representativas para todas as espécies. Fatores como custo e quantidade de análises limitaram o número de espécies avaliadas.

##### 4.4.1 Crescimento das plantas

O crescimento das plantas foi avaliado trimestralmente através da medição da altura das mudas a partir do plantio até 390 dias. Após este período, houve um intervalo de 528 dias até a última medição das mudas aos 918 dias após o plantio. O caminhamento durante as medições das plantas seguiu a mesma ordem de sequência do plantio das espécies.

Foram efetuadas regas nas duas áreas experimentais, quando as plantas apresentaram aspecto visual de *stress* hídrico ou em períodos de 14 dias na ausência de chuvas. Utilizou-se para as regas uma mangueira anti incêndio de 2,5 polegadas com bico nebulizador de água.

#### 4.4.2 Determinação da biomassa seca e diâmetro de colo

Foram coletadas oito plantas de cada parcela de ipê, casuarina e aroeira na área 4 e área 4T. Os critérios utilizados para a seleção dessas espécies foram o bom desenvolvimento vegetativo e o aspecto fitossanitário na época. No local da coleta, foram separadas as raízes da parte aérea. As amostras foram etiquetadas e acondicionadas em sacos plásticos. No laboratório foi feita a limpeza do material e posterior lavagem com água deionizada e secagem em estufa a 70°C até a obtenção de peso constante. Foram medidos os pesos das massas secas das raízes, caules e folhas das oito plantas de cada parcela das espécies citadas e obtiveram-se as médias dos pesos das oito plantas por parcela. O diâmetro de colo foi medido utilizando-se um paquímetro.

#### 4.4.3 Teor de metais pesados, macronutrientes e micronutrientes

A determinação dos teores de metais não essenciais (Al, Sb, Cr, Pb), metais essenciais que podem ser considerados como micronutrientes benéficos (Na, Ni, V) e micronutrientes restritos (Na, Ni, V) e os macronutrientes Ca e Mg, foram feitas pela digestão via seca a 500 °C e solubilizados com HCl a 10%, conforme a metodologia descrita por HILDEBRAND (1976).

Os teores de Na, Ni, Zn, Cr, Fe, Pb, Sb, e K foram determinados em espectrofotômetro de absorção atômica (modelo AA 1475 BAVARIAN), utilizando gás acetileno para a queima. Os teores dos elementos V, Al, Cr, Ca e Mg foram determinados através de absorção em aparelho de emissão de plasma (ARL/FISONS modelo 3410 + ICP).

#### 4.4.4 Análises de granulometria e química do solo

Para as análises granulométricas e químicas do solo, foi utilizada uma amostra composta para cada área experimental, obtida pela homogeneização de 15 sub-amostras coletadas com trado do tipo holandês e utilizando o caminhar em zig zag. As metodologias para a determinação da granulometria, pH, C, P, saturação de bases e capacidade de troca catiônica foram aquelas propostas pela EMBRAPA (1979) e foram feitas no Departamento de Solos do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Cabe salientar que na determinação granulométrica da área 4 (contaminada) reagiu-se o solo com água oxigenada durante 10 dias para eliminar o excesso de matéria orgânica.

#### 4.4.5 Conteúdo estimado da fração orgânica adicionada no solo

A quantidade aproximada da fração orgânica adicionada através dos resíduos e, considerada na área de biorremediação como sendo uma aproximação do teor de óleos e graxas da borra oleosa, foi determinada pela diferença das frações orgânicas encontradas na área 4 e área 4T. Esta fração orgânica foi determinada pela desidratação de alíquota com 2 g de peso seco na condição de TFSA (EMBRAPA, 1979), em estufa a 70 °C por 2 horas e posteriores queimas em mufla a 550 °C por 30 minutos e a 800 °C por 2 horas. A diferença de peso, após a desidratação e a última queima na mufla, determina o teor de carbono orgânico total. Quando obtidas as diferenças das frações orgânicas totais da área 4 e área 4T ao longo do tempo, foi determinada a degradação aproximada da borra oleosa da área 4. Essa metodologia é descrita no *método de ensaio M-6360/033* da PETROBRAS, citado no manual de operação do *landfarming* (PETROBRAS, 1995). Sabe-se ainda que compostos como óleos e graxas possuem cerca de 85 a 95% de carbono orgânico (BARTHA; BOSSERT, 1984; HUESEMANN; MOORE, 1993).

A coleta das amostras de solo foram feitas a 7 cm do colo das plantas da área 4, em cinco plantas de cada parcela de ipê, aroeira e casuarina. As cinco amostras foram homogeneizadas, obtendo-se uma amostra composta e replicada em três alíquotas de 2 g para a análise de óleos e graxas.

#### 4.4.6 Capacidade de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo foi elaborada, utilizando-se um disco poroso de cerâmica, com diâmetro de 30 cm, sobreposto e selado em seu perímetro, a um disco de acrílico com diâmetro de 32 cm. No centro do disco de acrílico, foi furado e acoplada uma mangueira de plástico transparente de 3/4 de polegada para exercer a tensão da coluna de água nas amostras de solo dispostas sobre o disco de cerâmica. Após estendida verticalmente, a mangueira e o espaço entre os discos foram preenchidos com água de maneira que se evitasse a formação de bolhas.

As tensões de coluna d'água foram dadas pelo comprimento entre a superfície do disco poroso onde foram dipostas as amostras e a extremidade inferior da mangueira estendida. Foram utilizadas amostras em condições de campo e TFSA, coletadas nas duas áreas experimentais. Para a coleta das amostras não deformadas, foram utilizados anéis metálicos de 33 cm<sup>3</sup> de volume interno. O modo de coleta e o preparo destas amostras estão descritos no manual da EMBRAPA (1979). Sem retirar o solo dos anéis de coleta, todas as amostras foram pré saturadas com água, deixando-as semi imersas num recipiente com água durante 24 horas. Depois de saturadas as amostras foram pesadas e dispostas sobre o disco poroso para serem aplicadas as tensões.

As tensões aplicadas foram de 10, 20, 40, 60, 100, 155 e 260 cm de coluna d'água durante um período de 48 horas. Após a aplicação da tensão, as amostras foram novamente pesadas, obtendo-se a quantidade de água extraída do solo devido aos níveis de tensão. Para cada nível de tensão, foram repetidas cinco amostras. Essa metodologia, utilizada por PREVEDELLO (1996), é fundamentada na adaptação de um tensiômetro que consiste num aparelho que mede a pressão negativa exercida pela água do solo em condições de campo. Os valores das umidades em função das tensões foram ajustados pela equação de Darcy, obtendo a curva de retenção de água no solo (PREVEDELLO, 1996).



#### 4.4.7 Microporosidade, densidade real e aparente do solo

A quantidade de microporos dos solos das áreas 4 e 4T foi determinada utilizando-se amostras de solo submetidas à tensão de 60 cm de coluna de água e secas a 105° C.

A densidade real foi determinada pelo volume gasto de álcool etílico (99%) necessário para preencher um balão volumétrico de 50 ml, contendo cerca de 20 g de solo na condição de TFSA e a densidade aparente foi determinada relacionando-se o peso seco da amostra (105° C) e o volume do anel metálico utilizado na amostragem (33 cm<sup>3</sup>). As metodologias para a determinação da quantidade de microporos e densidade real estão descritas no manual da EMBRAPA (1979).

#### 4.4.8 Atividade respiratória microbiana

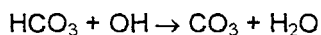
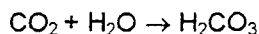
A eliminação de CO<sub>2</sub> pelos microrganismos foi utilizada como critério para a determinação da atividade respiratória da população microbiana do solo (COLEMAN; CROSSLEY, 1995; VANDECAVEYE, 1939). A atividade respiratória foi calculada pela quantidade de CO<sub>2</sub> liberado das amostras de solo incubadas *in vitro* no período de 7 dias e através de titulometria, utilizando-se NaOH (0,5N) como reagente e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,025N) como neutralizante. Os resultados foram expressos em mg de CO<sub>2</sub>/100g de solo seco (JENKINSON, 1976; JENKINSON; POWLSON, 1976 adaptado por CARVALHO; RIBAS, 1983<sup>10</sup> e citado por CARVALHO; ALMEIDA, 1996).

As amostras de solo foram coletadas aos 399, 525 e 600 dias após o plantio na área 4 e área 4T. No preparo das amostras, estas foram previamente secas ao ar e manipuladas até a obtenção de TFSA. Conforme a metodologia citada acima, o solo foi umedecido até 60 a 75% da capacidade de campo e incubado cerca de 30 g em frascos de vidro âmbar. A incubação do solo mais a adição do reagente foi feita por 7 dias. Após a determinação do conteúdo de CO<sub>2</sub> eliminado, a amostra foi incubada com novo reagente por mais 7 dias.

---

<sup>10</sup>CARVALHO, F. J. P. C.; RIBAS, Jr, J. S. Determinação da biomassa do solo pelo método de fumigação utilizando-se H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,019N e NaOH 0,5N. Relatório de aulas práticas. 1987.

Cabe salientar que no método gravimétrico, a reação de neutralização dá-se com NaOH que não reage ao CO<sub>2</sub>, e através da diferença da leitura da amostra de solo com a leitura de uma amostra sem solo (incubação somente do NaOH) obtém-se o CO<sub>2</sub> liberado pelos microrganismos.



#### 4.4.9 Contagem de fungos e bactérias do solo da área 4 e 4T

A contagem de fungos e bactérias foi feita em placas de petri, utilizando-se meio nutritivo estéril de MARTIN (MENZIES, 1965), composto de 1g de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,5g de 2MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, 0,5g de peptona, 10g de glicose, rosa bengala pré dissolvida e 15g de agar para cada litro de meio nutritivo. Foi adicionado estreptomicina (30mg/litro de solução nutritiva) a 1% em álcool etílico a 96° GL para a contagem de bactérias. Para o desenvolvimento das bactérias, foi retirado a rosa bengala do meio nutritivo.

A solução nutritiva foi vertida e inoculada com a solução de solo dentro de uma câmara de fluxo laminar. O período de incubação (27°C) foi de 4 a 6 dias, variando conforme o desenvolvimento adequado para a contagem. As diluições utilizadas para a obtenção das soluções de solo foram de 10<sup>-2</sup> para os fungos e 10<sup>-5</sup> para as bactérias. Foram feitas inicialmente testes de contagem para bactérias, utilizando diluições 10<sup>-4</sup>, 10<sup>-5</sup> e 10<sup>-6</sup> com três repetições para cada solução. Verificou-se que a melhor diluição para contagem de bactérias foi de 10<sup>-5</sup>. A quantidade de solução para cada placa foi de 0,1 a 0,5ml para os fungos e 20 a 100µl para as bactérias e cada amostra foi incubada com cinco repetições. As técnicas de preparo do meio nutritivo, incubação e contagem, foram aquelas propostas por NEDER (1992).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 DESENVOLVIMENTO E CRESCIMENTO DAS PLANTAS

Após 918 dias ou aproximadamente 2 anos e 7 meses do plantio das duas áreas experimentais, os maiores incrementos periódicos em altura considerando o crescimento após o plantio na área 4, onde foram aplicados 770,52 m<sup>3</sup> de borras olesas, comparado com a área testemunha, foram de acácia negra, eucalipto, bracatinga, cinamomo, canafístula e guabiroba. Na área testemunha, chamada também de área 4T, que foi somente arada e onde não foram aplicados os resíduos, as espécies que tiveram maior incremento quando comparadas com a área 4, foram o cupressus, casuarina, pitanga e aroeira.

As menores sobrevivências em todo o experimento foram encontradas na área 4T, com valores menores que 5% nas parcelas de erva-mate, ipê-amarelo e tipuana. Na área 4, as espécies de menor sobrevivência foram erva-mate, tipuana, e bracatinga que embora tenham alcançado 11%, 12% e 19% de sobrevivência respectivamente, evidenciaram uma baixa adaptação às condições de contaminação. As espécies com maior sobrevivência em ambas áreas experimentais foram canafístula, casuarina e cupressus, com valores superiores a 81% na área 4, e superiores a 90% na área 4T (tabela 7). Estas espécies podem ser consideradas como as mais adequadas ao objetivo proposto e tolerantes ao tratamento com resíduos oleosos na área de biorremediação (área 4).

Além dos efeitos ocasionados pelos resíduos, outros fatores contribuíram para causar danos físicos e na fisiologia das plantas, reduzindo a sobrevivência e aumentando as diferenças no desenvolvimento vegetativo nas parcelas da mesma espécie e entre espécies. Aos 78 dias após o plantio, as parcelas de tipuana da área 4T foram atacadas por lebres, eliminando 60% das plantas, e as rebrotas foram periodicamente consumidas pelos animais. A ovoposição de insetos nos ramos das mudas de bracatinga causaram seca nos ramos e atraso no crescimento. As parcelas de acácia negra foram atacadas pelo inseto *Oncideres impluviata* ou “serrador”, considerado uma das principais pragas desta espécie (IPEF-SIF, 1993), promovendo seca e queda dos ramos das árvores.

Nas parcelas de aroeira, acácia negra e bracatinga, as plantas floresceram e frutificaram prematuramente após o plantio, aproximadamente aos 11 meses na área 4T e aos 15 meses na área 4. As condições físicas e nutricionais desfavoráveis, típicas dos solos de “áreas de empréstimo”, somado aos efeitos negativos dos resíduos, podem ter causado condições de estresse hídrico ou nutricional, ocasionando este efeito nas áreas experimentais.

Na tabela 7 nota-se nas parcelas de tipuana, aroeira e erva-mate da área 4, que os incrementos periódicos em altura (918 dias) foram negativos devido principalmente aos danos físicos nos ramos apicais causados por animais (tipuana), queima por insolação direta nos ponteiros (erva-mate) e possivelmente por desequilíbrio nutricional. A alta mortalidade da erva-mate deve-se ao fato desta espécie não suportar ação direta dos raios solares. Normalmente utiliza-se métodos de sombreamento para seu cultivo comercial (EMATER, 1989). Nas figuras 5 a 17 estão as curvas de crescimento em altura de todas as espécies na área 4 e área 4T.

TABELA 7 - ALTURA MÉDIA (cm), INCREMENTO PERIÓDICO (cm) E SOBREVIVÊNCIA (%) AOS 918 DIAS APÓS O PLANTIO NA ÁREA 4 (CONTAMINADA) E ÁREA 4T (TESTEMUNHA)

ESPÉCIE	ALTURA MÉDIA (cm)		INCREMENTO MÉDIO (cm)		SOBREVIVÊNCIA (%)	
	Área 4 <sup>(a)</sup>	Área 4T <sup>(a)</sup>	Área 4 <sup>(a)</sup>	Área 4T <sup>(a)</sup>	Área 4	Área 4T
Acacia negra	175,00 a	120,97 a	89,37 a	62,50 a	33,33	27,78
Eucalyptus	95,40 b	103,58 b	56,12 ab	49,25 ab	54,17	82,32
Bracatinga	63,00 bc	70,69 c	37,47 ab	8,50 d	11,81	15,36
Cupressus	48,53 bc	72,30 c	23,25 bc	46,12 ab	81,94	90,97
Casuarina	47,83 bc	85,10 c	7,50 bc	40,37 bc	89,58	94,44
Pitanga	18,64 c	19,41 e	3,66 bc	9,00 d	26,39	66,67
Erva-mate	9,14 c	— <sup>(b)</sup>	-2,56 c	— <sup>(b)</sup>	11,11	2,08
Cinamomo	20,53 c	21,75 e	8,91 bc	8,00 d	38,89	61,11
Ipê - amarelo	13,44 c	— <sup>(b)</sup>	6,42 bc	— <sup>(b)</sup>	70,14	2,08
Tipuana	41,91 c	— <sup>(b)</sup>	-7,50 c	— <sup>(b)</sup>	19,44	4,17
Aroeira	27,90 c	49,09 d	-0,21 c	29,37 c	77,78	63,57
Canafístula	35,00 c	30,16 e	12,5 bc	8,62 d	95,14	93,75
Guabiroba	23,04 c	24,90 e	1,87 c	1,25 d	76,39	86,11

NOTA : <sup>(a)</sup>Números da mesma coluna seguidos de letras iguais não são significativamente diferentes (teste LSD, com p<0,05).

<sup>(b)</sup>Espaços tracejados representam valores desconsiderados estatisticamente por motivo de sobrevivência menor do que 5%.

FIGURA 5 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE EUCALIPTO DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

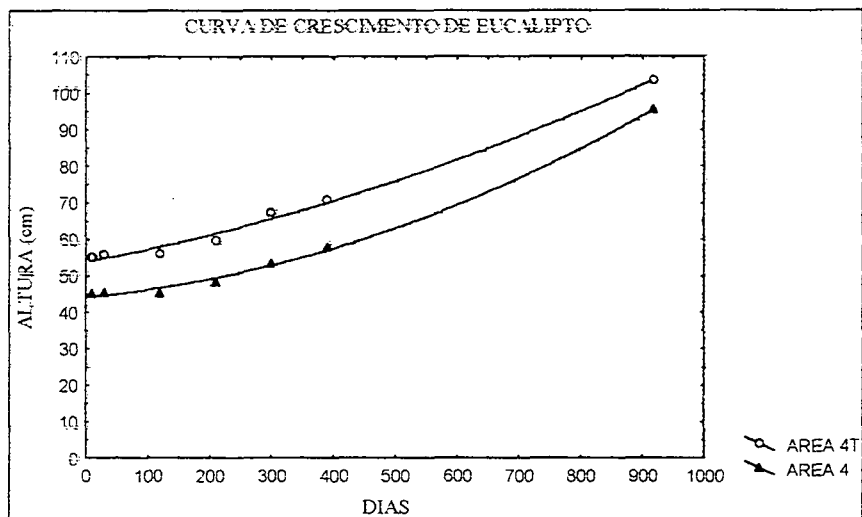


FIGURA 6 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE TIPIANA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

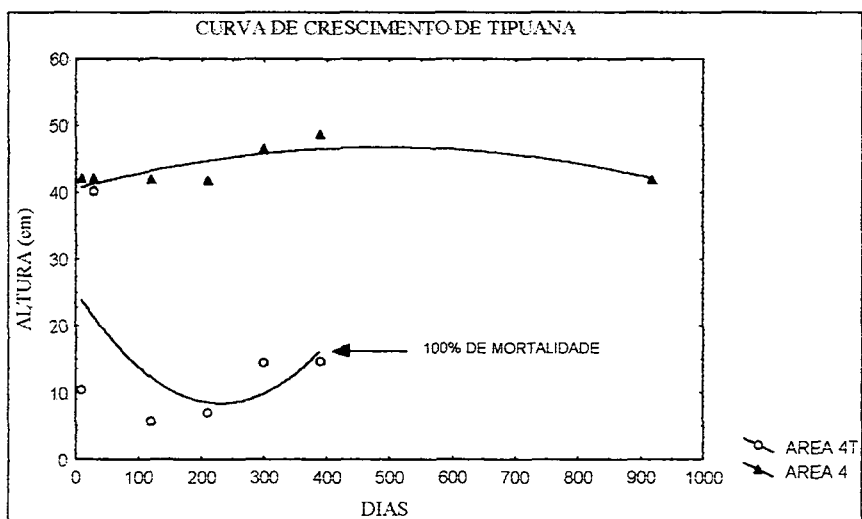


FIGURA 7 -CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE AROEIRA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

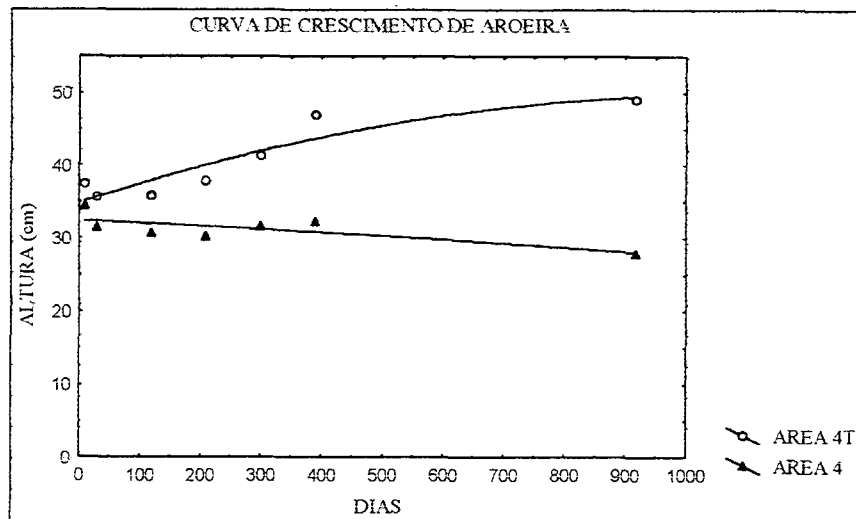


FIGURA 8 -CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE PITANGA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

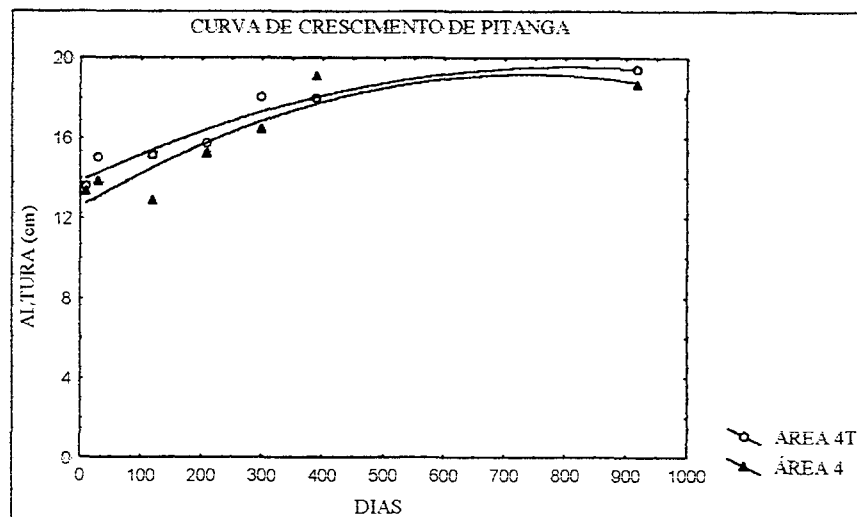


FIGURA 9 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE CANAFÍSTULA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

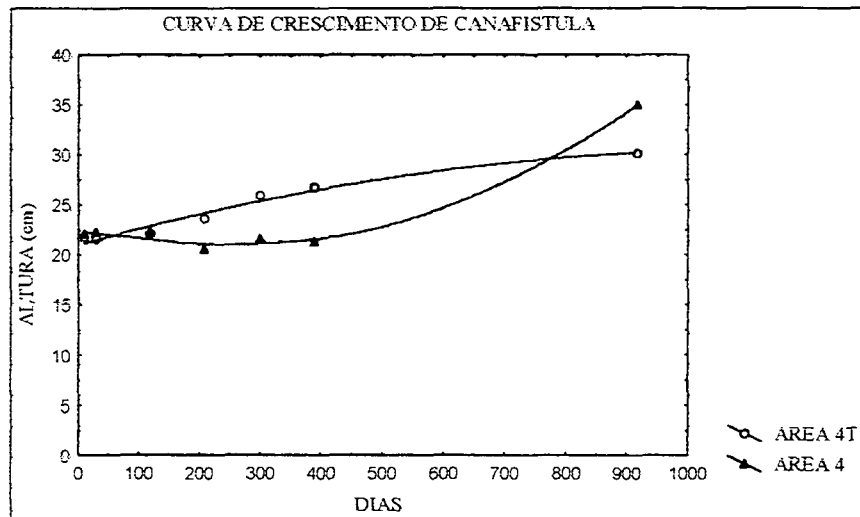


FIGURA 10 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE GUABIROBA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

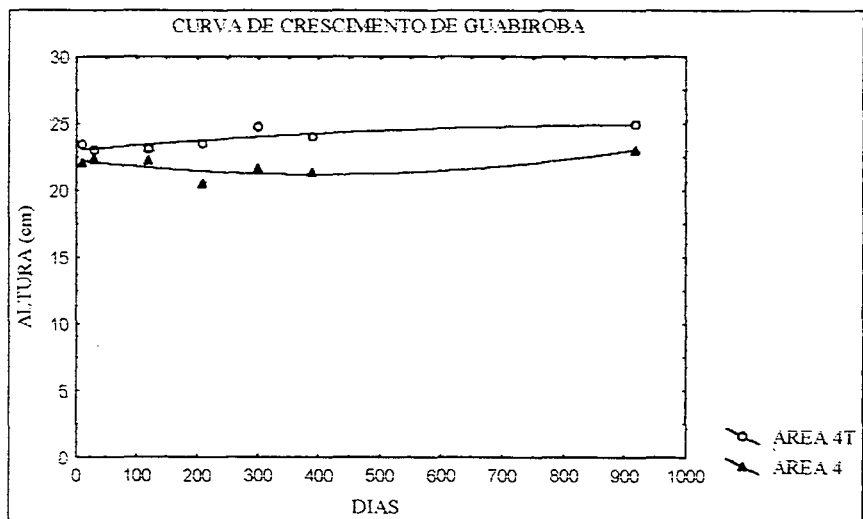


FIGURA 11 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE CASUARINA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

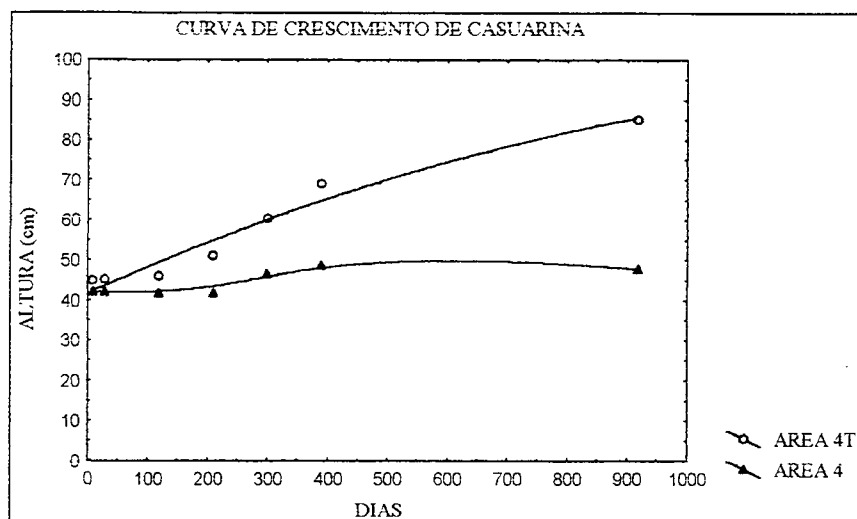


FIGURA 12 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE CUPRESSUS DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

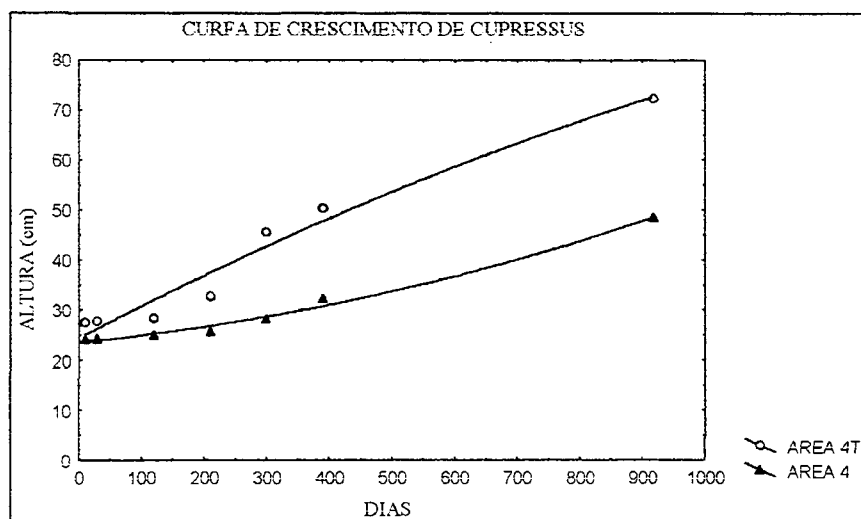




FIGURA 13 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE IPÊ DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

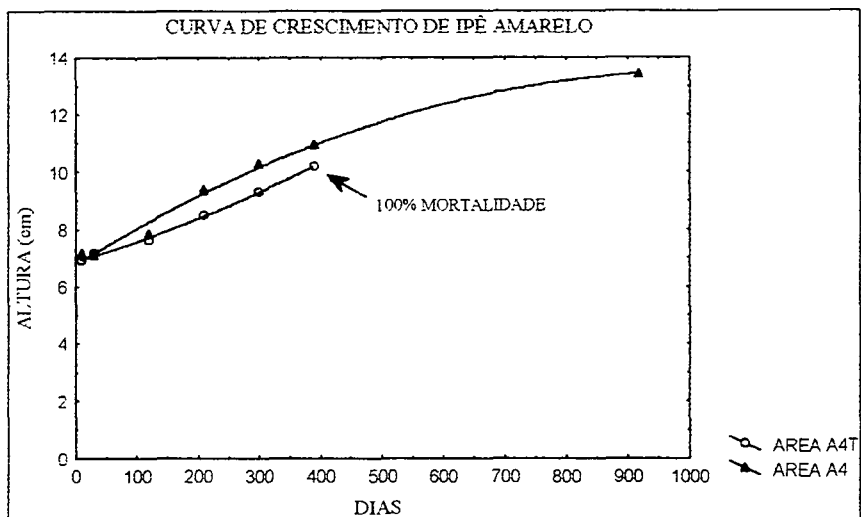


FIGURA 14 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE ERVA-MATE DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

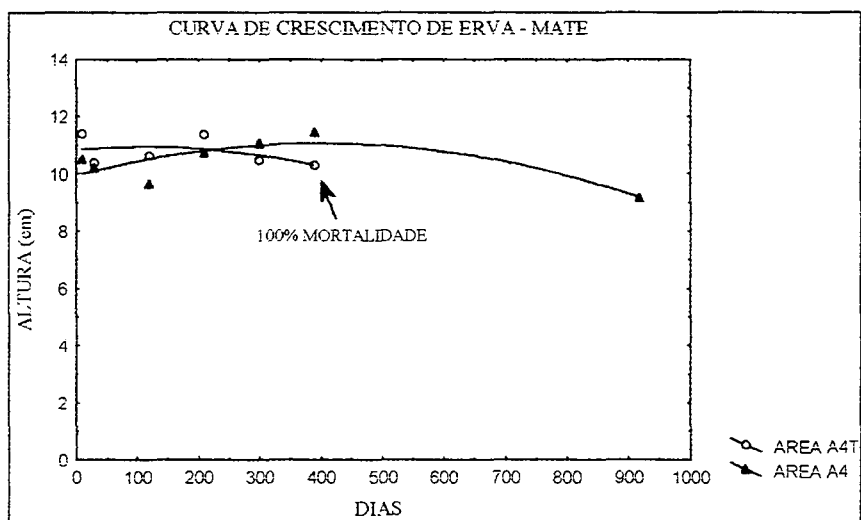


FIGURA 15 -CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE CINAMOMO DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

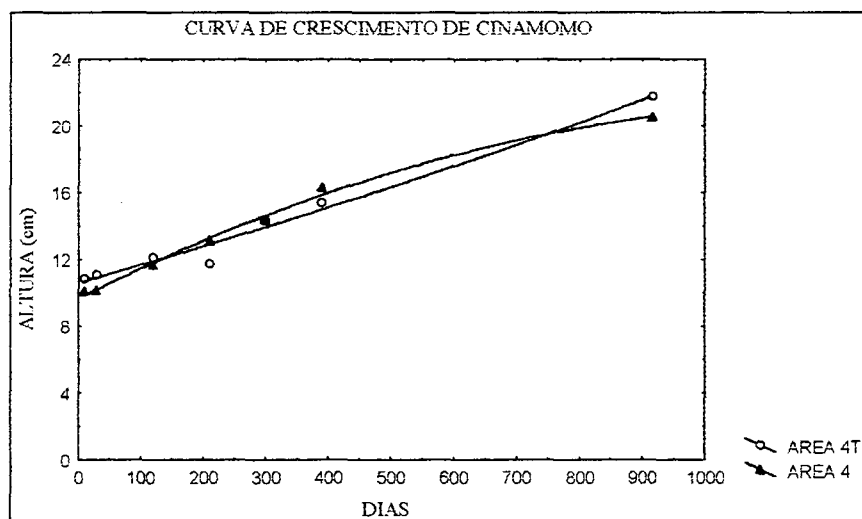


FIGURA 16 -CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE BRACATINGA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO

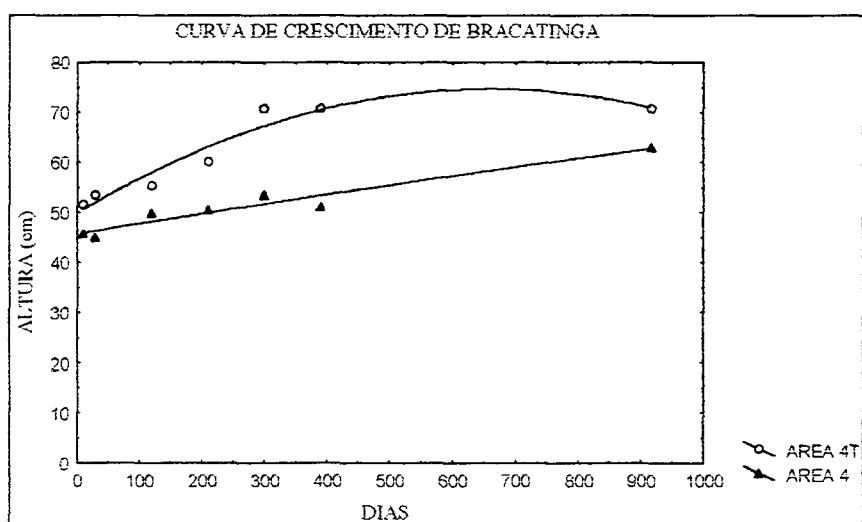
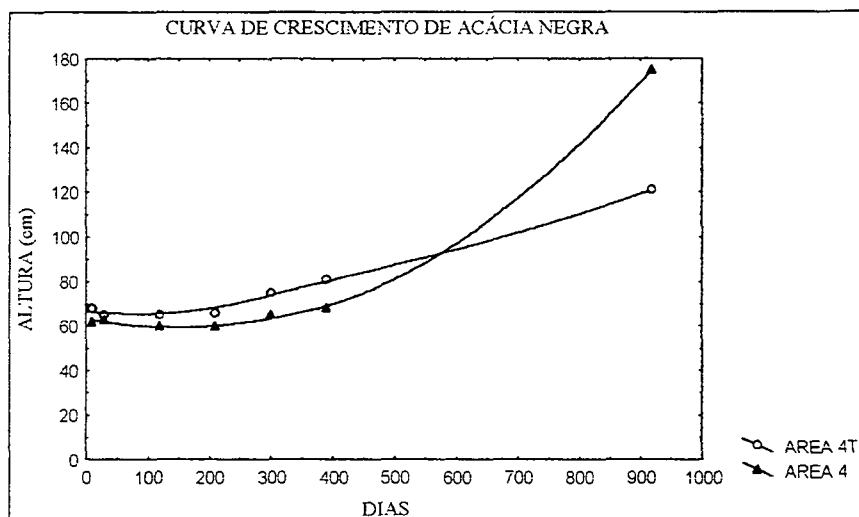


FIGURA 17 - CURVA DE CRESCIMENTO EM ALTURA (cm) DE ACÁCIA NEGRA DO PLANTIO AOS 918 DIAS DE DESENVOLVIMENTO



#### 5.1.1 Produção de biomassa e diâmetro de colo

A produção de biomassa em peso seco das plantas coletadas nas parcelas de aroeira, casuarina e ipê amarelo na área 4 (contaminada) e área 4T (testemunha) é apresentada nas tabelas 8 e 9.

TABELA 8 - BIOMASSA (peso seco em g) DE OITO PLANTAS NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA E CASUARINA NA ÁREA 4 (CONTAMINADA) AOS 530 DIAS APÓS O PLANTIO

ESPÉCIE	IDADE DA MUDA NO PLANTIO (meses)	RAIZ	CAULE	FOLHA	TOTAL PARTE AÉREA
Ipê amarelo	10	31,21	9,81	0,83	10,64
Aroeira	11	12,38	18,24	6,05	24,09
Casuarina	5	21,38	20,33	21,30	41,63

TABELA 9 - BIOMASSA (peso seco em g) DE OITO PLANTAS NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA E CASUARINA NA ÁREA 4T (TESTEMUNHA) AOS 550 DIAS APÓS O PLANTIO

ESPÉCIE	IDADE DA MUDA NO PLANTIO (meses)	RAIZ	CAULE	FOLHA	TOTAL PARTE AÉREA
Ipê amarelo	10	47,87	15,51	7,13	22,64
Aroeira	11	69,47	102,77	50,59	153,36
Casuarina	5	62,14	77,50	70,83	148,33

TABELA 10 - DIÂMETRO DE COLO (mm) DE IPÊ AMARELO, CASUARINA E AROEIRA NAS ÁREAS 4 E 4T AOS 550 DIAS APÓS O PLANTIO

ESPÉCIE	IDADE DA MUDA NO PLANTIO (meses)	ÁREA 4	ÁREA 4T
Ipê amarelo	10	5,18 ±0,89	7,45 ±2,28
Aroeira	11	5,31 ±1,17	12,54 ±3,23
Casuarina	5	4,70 ±1,89	10,30 ±1,74

A quantidade de matéria seca produzida pela casuarina na área contaminada e sua boa sobrevivência (89,6%), indicando tolerância ao solo contaminado, sugerem a utilização desta espécie, quando comparada ao ipê amarelo e aroeira para a obtenção de biomassa nas condições de contaminação por resíduos oleosos de petróleo.

#### 5.1.2 Teores dos macronutrientes, micronutrientes e metais pesados em ipê amarelo, casuarina e aroeira

As tabelas 13 e 14 mostram o conteúdo dos metais não essenciais, macro e micronutrientes nas raízes, caules e folhas da aroeira, casuarina e ipê amarelo nas áreas 4 e 4T.

TABELA 11 - TEOR MÉDIO (mg/kg da massa seca) DE METAIS NÃO ESSENCIAIS, MICRONUTRIENTES E MACRONUTRIENTES NA RAIZ, CAULE E FOLHA DE IPÊ, AROEIRA, CASUARINA NA ÁREA 4

IPÊ													
RAIZ	Ca(a)	Mg(a)	Fe(b)	K(a)	Al(b)	Zn(b)	Na(c)	Cu(a)	V(b)	Ni(a)	Cr(a)	Pb(a)	Sb
	4685,18	1466,09	1301,94	730,01	432,57	76,11	42,55	33,86	11,55	2,99	2,70	0	0
CAULE	Ca[a]	Mg[ab]	Fe[a]	K[a]	Al[a]	Na[b]	Zn[a]	Cu[a]	V[a]	Cr[a]	Ni[a]	Pb	Sb
	7061,14	1080,55	917,60	715,36	631,61	140,80	72,61	20,14	16,29	4,47	1,10	0	0
FOLHA	Ca{a}	Mg{a}	K{a}	Fe{ab}	Al{a}	Na{a}	Zn{ab}	V{a}	Cu{a}	Cr{a}	Ni{a}	Pb{a}	Sb
	16443,68	2807,93	1171,8	672,41	490,36	411,4	103,93	26,76	23,13	7,84	4,88	0	0
AROEIRA													
RAIZ	Ca(a)	Fe(a)	Mg(a)	Al(ab)	K(a)	Na(a)	Zn(ab)	Cu(a)	V(b)	Ni(a)	Cr(a)	Pb(a)	Sb
	2846,27	1850,49	1263,99	895,58	600,62	250,67	174,47	51,67	19,00	16,58	3,51	0	0
CAULE	Ca[b]	Mg[b]	K[b]	Fe[b]	Na[a]	Zn[a]	Al[b]	Cu[a]	Cr[a]	V[a]	Ni[a]	Pb	Sb
	3811,19	947,21	470,59	331,65	270,48	68,92	57,00	26,17	9,49	3,12	1,77	0	0
FOLHA	Ca{ab}	Mg{a}	K{a}	Na{a}	Fe{b}	Al{a}	Zn{b}	V{a}	Cu{a}	Ni{a}	Cr{a}	Pb{a}	Sb
	12960,69	3009,70	864,4	539,61	333,59	113,52	40,37	15,99	6,72	2,27	1,58	0	0
CASUARINA													
RAIZ	Ca(a)	Al(a)	Fe(a)	Mg(a)	Zn(a)	K(b)	Na(b)	Cu(a)	V(a)	Ni(a)	Cr(a)	Pb(a)	Sb
	4518,01	2329,98	1902,70	812,17	343,67	213,02	110,68	62,06	36,34	18,35	15,76	3,57	0
CAULE	Ca[b]	Mg[a]	K[b]	Fe[b]	Na[b]	Al[b]	Zn[a]	Cu[a]	V[a]	Ni[a]	Cr[a]	Pb	Sb
	6215,00	1565,11	498,60	298,33	124,90	75,35	62,15	30,69	6,72	5,64	9,51	0	0
FOLHA	Ca{b}	Mg{a}	Fe{a}	K{a}	Na{a}	Al{a}	Zn{a}	Cu{a}	V{a}	Ni{a}	Cr{a}	Pb{a}	Sb
	12489,58	2935,54	762,12	727,4	412,71	212,30	151,21	26,55	17,72	9,31	1,37	0,89	0

NOTA : Letras iguais entre parenteses, barras ou colchetes, representam valores estatisticamente iguais entre o mesmo elemento e entre as espécies (Tuckey, p<0,05). <sup>(a)</sup> As médias foram obtidas a partir de 4 amostras.

TABELA 12 - TEOR MÉDIO (mg/Kg da massa seca) DE METAIS NÃO ESSENCIAIS, MICRONUTRIENTES E MACRONUTRIENTES NA RAIZ, CAULE E FOLHA DE IPÊ, AROEIRA, CASUARINA NA ÁREA 4T

IPÊ													
RAIZ	Ca(a)	Mg(a)	Al(a)	Fe(b)	K(b)	Na(b)	Cu(a)	Zn(ab)	V(a)	Pb	Sb	Cr(a)	Ni
	1153,36	4723,94	2559,43	1034,69	635,83	61,93	28,25	14,48	0,62	0	0	0	0
CAULE	Ca[a]	Mg[a]	Al[a]	Fe[a]	K[b]	Na[ab]	Zn[a]	Cu[a]	Pb	Sb	Cr[a]	Ni	V
	7837,00	951,37	964,93	522,00	514,60	101,30	25,72	24,50	0	0	0	0	0
FOLHA	Ca{a}	Al{a}	Mg{a}	Fe{a}	K{c}	Na{c}	Zn{a}	Cu{a}	V{a}	Ni{a}	Pb{a}	Sb	Cr{a}
	16156,58	2730,09	2421,60	1414,41	490,26	192,22	73,25	42,47	5,27	1,90	0	0	0
AROEIRA													
RAIZ	Ca(a)	Mg(a)	Al(a)	Fe(b)	K(a)	Na(a)	Cu(a)	Zn(b)	Cr(a)	V(a)	Pb	Sb	Ni
	4655,49	1421,76	1226,90	1041,53	818,74	189,80	18,31	8,14	5,40	0,44	0	0	0
CAULE	Ca[a]	Mg[a]	K[a]	Fe[ab]	Al[b]	Na[a]	Cu[a]	Zn[c]	Cr[a]	V	Pb	Sb	Ni
	7283,42	931,53	602,08	286,20	154,82	120,93	15,03	11,04	2,44	0	0	0	0
FOLHA	Ca{a}	Mg{a}	Al{a}	K{a}	Fe{a}	Na{a}	Zn{b}	Cu{a}	V{a}	Cr{a}	Pb{a}	Sb	Ni
	15895,82	2574,52	974,50	846,74	721,99	411,18	29,59	18,25	4,16	0,22	0	0	0
CASUARINA													
RAIZ	Ca(a)	Mg(a)	Al(a)	Fe(a)	K(c)	Na(a)	Zn(a)	Cu(a)	V(a)	Cr(a)	Pb	Sb	Ni
	6614,36	933,69	4109,08	1503,36	266,49	140,49	28,25	13,89	2,35	0	0	0	0
CAULE	Ca[a]	Mg[a]	K[c]	Fe[b]	Al[b]	Na[b]	Zn[b]	Cu[a]	Cr[a]	V	Pb	Sb	Ni
	7646,63	778,09	438,31	186,53	172,71	77,29	13,35	12,91	0	0	0	0	0
FOLHA	Ca{b}	Mg{a}	Al{a}	K{b}	Fe{a}	Na{b}	Zn{b}	Cu{a}	Ni{a}	V{a}	Pb{a}	Cr{a}	Sb
	10784,03	1902,35	1055,76	714,98	678,35	309,05	46,78	12,87	1,58	1,15	0,89	0	0

NOTA : Letras iguais entre parenteses, barras ou colchetes, representam valores estatisticamente iguais entre o mesmo elemento e entre as espécies (Tuckey, p<0,05). <sup>(a)</sup> As médias foram obtidas a partir de 4 amostras.

TABELA 13 - CONTEÚDOS (mg/massa seca produzida) DE METAIS NÃO ESSENCIAIS, MICRONUTRIENTES E MACRONUTRIENTES NA RAIZ, CAULE E FOLHA DE OITO PLANTAS NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA, CASUARINA NA ÁREA 4

IPÊ													
RAIZ	Ca(a) 146,22	Mg(a) 45,76	Fe(a) 40,63	K(a) 22,78	Al(b) 13,50	Zn(b) 2,38	Na(c) 1,33	Cu(a) 1,06	V(b) 0,36	Ni(a) 0,09	Cr(a) 0,08	Pb(a) 0	Sb 0
CAULE	Ca[b] 69,27	Mg[b] 10,6	Fe[a] 9,00	K[b] 7,02	Al[a] 6,20	Na[b] 1,38	Zn[a] 0,71	Cu[a] 0,20	V[a] 0,16	Cr[a] 0,04	Ni[a] 0,01	Pb 0	Sb 0
FOLHA	Ca{c} 13,65	Mg{c} 2,33	K{c} 0,97	Fe{b} 0,56	Al{b} 0,41	Na{b} 0,34	Zn{b} 0,09	Cu{b} 0,02	V{c} 0,02	Cr{a} 0,01	Pb 0	Sb 0	Ni{a} 0
AROEIRA													
RAIZ	Ca(b) 35,24	Fe(b) 22,91	Mg(b) 15,65	Al(b) 11,09	K(b) 7,44	Na(a) 3,10	Zn(b) 2,16	Cu(a) 0,64	V(b) 0,24	Ni(a) 0,21	Cr(a) 0,04	Pb(a) 0	Sb 0
CAULE	Ca[b] 69,52	Mg[b] 17,28	K[ab] 8,58	Fe[a] 6,05	Na[a] 4,93	Zn[a] 1,26	Al[a] 1,04	Cu[a] 0,48	Cr[a] 0,17	V[a] 0,06	Ni[a] 0,03	Pb 0	Sb 0
FOLHA	Ca{b} 78,41	Mg{b} 18,21	K{b} 5,23	Na{b} 3,26	Fe{b} 2,02	Al{b} 0,69	Zn{b} 0,24	V{b} 0,10	Cu{b} 0,04	Cr{a} 0,01	Ni{a} 0,01	Pb 0	Sb 0
CASUARINA													
RAIZ	Ca(ab) 96,60	Al(a) 49,81	Fe(a) 40,68	Mg(b) 17,36	Zn(a) 7,35	K(b) 4,55	Na(b) 2,37	Cu(a) 1,33	V(a) 0,78	Ni(a) 0,39	Cr(a) 0,34	Pb(a) 0,08	Sb 0
CAULE	Ca[a] 126,35	Mg[a] 31,82	K[a] 10,14	Fe[a] 6,07	Na[b] 2,54	Al[a] 1,53	Zn[a] 1,26	Cu[a] 0,62	Cr[a] 0,19	V[a] 0,14	Ni[a] 0,11	Pb 0	Sb 0
FOLHA	Ca{a} 266,03	Mg{a} 62,53	Fe{a} 16,23	K{a} 15,49	Na{a} 8,79	Al{a} 4,52	Zn{a} 3,22	Cu{a} 0,57	V{a} 0,38	Ni{a} 0,20	Cr{a} 0,03	Pb 0	Sb 0

NOTA : Letras iguais entre parenteses, barras e colchetes, representam valores estatisticamente iguais entre o mesmo elemento e entre as espécies (Tuckey,  $p < 0,05$ ). <sup>(a)</sup> As médias foram obtidas a partir de 4 amostras.

TABELA 14 - CONTEÚDOS (mg/massa seca produzida) DE METAIS NÃO ESSENCIAIS, MICRONUTRIENTES E MACRONUTRIENTES NA RAIZ, CAULE E FOLHA DE OITO PLANTAS NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA, CASUARINA NA ÁREA 4T

IPÊ													
RAIZ	Ca(b) 226,14	Al(ab) 122,52	Mg(b) 55,21	Fe(b) 49,53	K(b) 30,44	Na(c) 2,96	Cu(a) 1,35	Zn(b) 0,69	V(a) 0,03	Cr(a) 0	Pb 0	Sb 0	Ni 0
CAULE	Ca[c] 121,55	Mg[c] 14,76	Al[a] 14,97	Fe[b] 8,10	K[c] 7,98	Na[b] 1,57	Zn[b] 0,40	Cu[a] 0,38	V 0	Cr[a] 0	Pb 0	Sb 0	Ni 0
FOLHA	Ca{b} 115,20	Mg{b} 17,27	Al{a} 19,47	Fe{b} 10,08	K{c} 3,50	Na{b} 1,37	Zn{c} 0,52	Cu{a} 0,30	V{a} 0,04	Ni{a} 0,01	Pb{a} 0	Cr{a} 0	Sb 0
AROEIRA													
RAIZ	Ca(ab) 323,42	Mg(a) 98,77	Al(b) 85,23	Fe(ab) 72,36	K(a) 56,88	Na(a) 13,19	Cu(a) 1,27	Zn(b) 0,57	Cr(a) 0,38	V(a) 0,03	Pb 0	Sb 0	Ni 0
CAULE	Ca[a] 748,52	Mg[a] 95,73	K[a] 61,88	Fe[a] 29,41	Al[a] 15,91	Na[a] 12,43	Cu[a] 1,55	Zn[a] 1,14	Cr[a] 0,25	V 0	Pb 0	Sb 0	Ni 0
FOLHA	Ca{a} 804,17	Mg{a} 130,24	Al{a} 49,30	K{b} 42,84	Fe{a} 36,53	Na{a} 20,80	Zn{b} 1,50	Cu{a} 0,92	V{a} 0,21	Cr{a} 0,01	Pb{a} 0	Ni{a} 0	Sb 0
CASUARINA													
RAIZ	Ca(a) 411,02	Al(a) 255,3	Fe(a) 93,42	Mg(a) 58,02	K(c) 16,56	Na(b) 8,73	Zn(a) 1,76	Cu(a) 0,86	V(a) 0,15	Cr(a) 0	Pb 0	Sb 0	Ni 0
CAULE	Ca[b] 592,61	Mg[b] 60,3	K[b] 33,97	Fe[b] 14,46	Al[a] 13,38	Na[b] 5,99	Zn[a] 1,04	Cu[a] 1,00	Cr[a] 0	V 0	Pb 0	Sb 0	Ni 0
FOLHA	Ca{a} 763,83	Mg{a} 134,74	Al{a} 74,78	K{a} 50,64	Fe{a} 48,05	Na{a} 21,89	Zn{a} 3,31	Cu{a} 0,91	Ni{a} 0,11	V{a} 0,08	Pb{a} 0,06	Cr{a} 0	Sb 0

NOTA : Letras iguais entre parenteses, barras e colchetes, representam valores estatisticamente iguais entre o mesmo elemento e entre as espécies (Tuckey,  $p < 0,05$ ). <sup>(a)</sup> As médias foram obtidas a partir de 4 amostras.

Na área contaminada (área 4) (tabelas 13) a casuarina acumulou na parte aérea total (caule e folhas) maiores quantidades dos macronutrientes Ca, Mg e K, do que ipê e aroeira. Quanto ao restante dos metais analisados e considerando os teores (ppm) na parte aérea total (tabela 11), o Zn, Cu e Ni encontrados na casuarina, estão em níveis considerados tóxicos às plantas segundo a classificação de KABATA-PENDIAS e PENDIAS (1985). No ipê, os níveis de Zn, Cu e Cr também podem ser considerados tóxicos às plantas segundo o mesmo autor. Cabe ressaltar que é difícil a delimitação clara da quantidade adequada e a quantidade suficiente e excessiva que exerce influência prejudicial ao metabolismo (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1985). Já na raiz, casuarina acumulou maiores quantidades dos metais Al, Cr, Pb, Zn, Cu, Fe, Ni e V, enquanto que ipê acumulou maiores quantidades dos macronutrientes Ca, Mg e K.

Na área testemunha (área 4T), a comparação entre as espécies estudadas apresentou a aroeira com as maiores quantidades na parte aérea total dos macronutrientes Ca, Mg e K, e dos metais Na, V, Cu, Fe e Cr. Casuarina apresentou na parte aérea total, maiores acúmulos dos metais Zn, Ni, Al e Pb (tabela 14) e ipê destaca-se por apresentar na parte aérea total da planta, os maiores teores (ppm) de Ca, Zn, Cu, Fe, Ni, V e Al (tabela 12). O teor (ppm) de Cu nas folhas de ipê foi o único encontrado em nível considerado tóxico à planta (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1985). Na raiz a casuarina apresentou maiores quantidades dos metais Zn, Fe, V e Al, aroeira apresentou maior conteúdo de Na e Cr, e ipê acumulou maior quantidade de Cu (tabela 14). Quanto aos macronutrientes na raiz, aroeira apresentou maiores conteúdos de Mg e K, enquanto que casuarina acumulou maior quantidade de Ca (tabela 14).

Os teores de alumínio encontrados nas espécies analisadas foram menores na área contaminada (área 4) do que na área testemunha (área 4T). Apesar da adição de alumínio através dos resíduos, os ácidos orgânicos produzidos pela população microbiana no processo de degradação dos resíduos podem ter agido como agentes quelantes do elemento, contribuindo para a menor disponibilidade de alumínio às plantas (JONES, 1961<sup>11</sup>, citado por MALAVOLTA 1976). O aumento na concentração dos metais no solo da área contaminada, pode ter reduzido a absorção de

nutrientes essenciais como o Ca e Mg. Devido a este aumento na disponibilidade dos outros elementos, pode ter ocorrido uma maior competição na absorção dos diferentes íons na raiz (MARSCHNER, 1993a).

As raízes e folhas de casuarina na área contaminada apresentaram altos teores de zinco, respectivamente 343,67 e 151,21 mg/Kg da massa seca (tabela 11). LONGNECKER; ROBSON (1993) sugerem que em solos com alta disponibilidade de zinco, o teor do elemento é maior na raiz do que na parte aérea da planta. Segundo LONGNECKER; ROBSON (1993), a concentração média de zinco em folhas sadias de diversas espécies está entre 15 e 20 mg/Kg da massa seca. CHANEY (1993) considera o teor de 500 mg/Kg da massa seca das folhas como sendo o nível que o zinco passa a ser fitotóxico à planta, KABATA-PENDIAS; PENDIAS (1985), considera este estado fisiológico com níveis acima de 100 mg/Kg da massa seca das folhas. Possivelmente a matéria orgânica adicionada na área 4 através das borras oleosas, associada à ação microbiana no solo, contribuiu para aumentar disponibilidade e a conseqüente absorção do zinco (MARSCHNER, 1993b). A correlação negativa entre o pH e o teor de zinco das raízes das espécies estudadas (anexos 13, 16 e 19), sugere que a absorção do elemento aumentou com a redução do pH no solo da área 4 (tabela 18), este efeito é também estudado por MARSCHNER (1993b).

Cabe ressaltar que altas concentrações de elementos inorgânicos encontrados nas plantas podem ser justificados por fatores envolvendo o solo e a própria espécie vegetal. MENGEL; KIRKBY (1987), GRAHAM; RENGEL (1993), CHANEY (1993); ANTONOVICS et al.<sup>12</sup>, citado por CHANEY (1993) citam o potencial genético e a disponibilidade dos elementos no solo como sendo os principais fatores para a absorção destes elementos pela planta. PETERSON (1983) atribui ao *stress* fisiológico, bioquímico e genético esta capacidade das plantas em absorver altas concentrações de metais e ainda associa as características taxonômicas e fisiológicas da espécie como fatores para justificar esta habilidade. Essas características podem ser a adaptação metabólica (absorção de

---

<sup>11</sup> JONES, L. *Plant Soil*. V. 13, p. 297, 1961.

<sup>12</sup> ANTONOVICS, J.; BRADSHAW, A. D.; TURNER, R. G. Heavy metal tolerance in plants. *Adv. Ecol. Res.*, v. 7, p. 1-85. 1971.



moléculas de baixo ou alto peso molecular), adaptação da parede e membrana celular das raízes ao metal e adaptação enzimática.

É provável que os nódulos do actinomiceto *Frankia* formados nas raízes de casuarina, tipicamente associados a esta espécie, tenham favorecido a absorção dos nutrientes juntamente com outros íons. AUER; SILVA (1992) discutem a fixação de nitrogênio através da simbiose de microrganismos com espécies arbóreas não leguminosas.

Quanto aos demais metais encontrados em níveis excessíveis no ipê (Cr), casuarina (Cu e Ni), o Cr tem a característica de ser facilmente indisponibilizado às plantas através da conversão de  $\text{Cr}^{+6}$  (solúvel) ao  $\text{Cr}^{+3}$  (insolúvel), principalmente através da adição de matéria orgânica (MALAVOLTA, 1994). O Ni e Cu parecem ter sua disponibilidade também relacionada com a matéria orgânica e com o pH do solo (MALAVOLTA, 1994).

Devido à pouca idade das plantas das espécies estudadas, é mostrada apenas uma tendência da capacidade de acumulação de metais pesados. Os efeitos dos resíduos no desenvolvimento das mudas sugerem numa primeira etapa do processo de fitorremediação, o recobrimento do solo com espécies forrageiras que podem fornecer em menor período de tempo e de maneira mais homogênea, uma maior quantidade de matéria orgânica. O rápido desenvolvimento de biomassa radicial das forrageiras, as tornam mais eficientes na degradação de compostos químicos orgânicos e inorgânicos na rizosfera.

## 5.2 SINTOMAS DAS PLANTAS OBSERVADOS NA ÁREA 4 E 4T

Alguns sintomas de desequilíbrio nutricional foram observados nas áreas experimentais e são mostrados na figura 18.

FIGURA 18 - SINTOMAS DE DESEQUILÍBRIO NUTRICIONAL NAS 13 ESPÉCIES NAS ÁREAS 4 E ÁREA 4T

ESPÉCIE	ÁREA 4 (CONTAMINADA)	ÁREA 4T (TESTEMUNHA)
Pitanga	Seca e queda das folhas apicais	Nenhum sintoma visível
Erva-mate	Alta mortalidade; queima de ponteiros	Alta mortalidade; queima de ponteiros
Cinamomo	Amarelecimento e queda das folhas basais	Amarelecimento e queda das folhas basais
Cupressus	Bronzeamento das folhas basais e seca generalizada	Nenhum sintoma visível
Ipê-amarelo	Folhas basais amareladas	Folhas basais amareladas
Tipuana	Seca nos ponteiros	Murcha, amarelecimento e queda das folhas
Eucalipto	Queda de folha; estiolamento do ramo apical, avermelhamento das folhas mais jovens	Avermelhamento das folhas mais jovens
Bracatinga	Queda generalizada das folhas e seca dos ramos	Amarelecimento das folhas
Acácia negra	Bronzeamento na ponta dos folíolos; seca dos ponteiros	Amarelecimento dos folíolos e seca dos ponteiros
Aroeira	Amarelecimento e queda de folhas apicais	Folhas novas avermelhadas
Canafístula	Queda das folhas basais; amarelecimento dos folíolos	Nenhum sintoma visível
Guabioba	Folhas com manchas necróticas; amarelecimento e queda das folhas basais	Amarelecimento e queda das folhas apicais
Casuarina	Acículas avermelhadas e curtas	Acículas basais amareladas

Os sintomas observados nas plantas são de difícil interpretação. A adição da mistura de resíduos oleosos na área 4 sugere o aparecimento de sintomas de toxidez aos micronutrientes e metais pesados ou carência induzida por excesso de outro elemento inorgânico. Entretanto, o surgimento em algumas espécies de sintomas semelhantes nas áreas 4 e 4T, mostra que o acúmulo de metais no solo não produziu níveis de toxidez suficiente para provocar sintomas claros de excesso ou deficiência de metais ou nutrientes nas partes aéreas.

Além dos sintomas descritos na figura 18, a coloração das plantas da área 4 pareceu mais verde escuro quando comparada com a das plantas da área 4T. De modo geral, foi menor o desenvolvimento das plantas na área 4 em relação à área 4T, conforme as variáveis crescimento, biomassa e diâmetro de colo (tabelas 7, 8, 9 e 10).

### 5.3 EFEITO NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

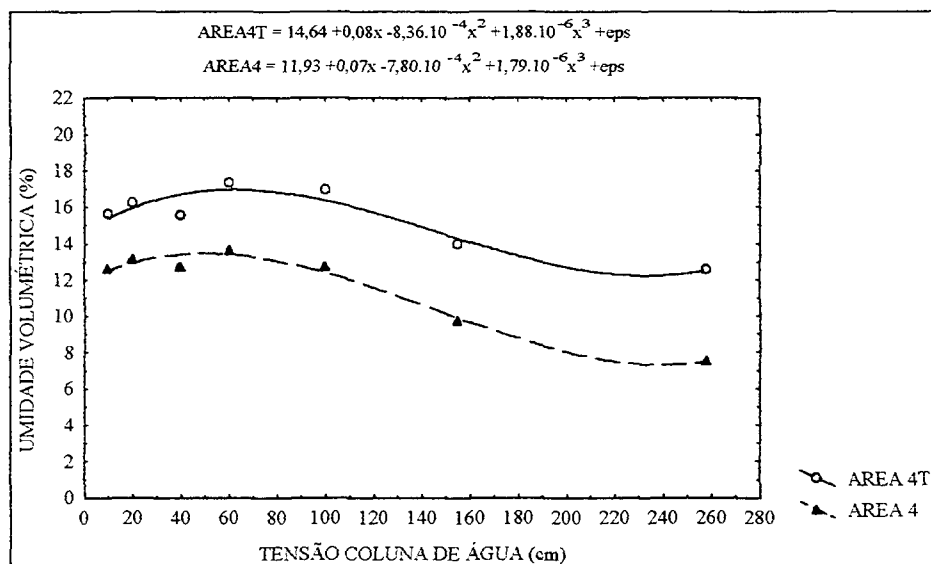
Os resultados dos testes de retenção de água no solo mostraram que a adição dos resíduos na área 4, reduziu a capacidade de retenção de água no solo (figuras 19 e 20). A curva representativa das condições de retenção de água indica que a área 4 reteve menores quantidades de água, quando comparada com o solo da área 4T, sendo esta uma característica de solos arenosos ou compactados (PREVEDELLO, 1996). Provavelmente, as partículas de solo quando envolvidas por material oleoso proveniente dos resíduos, evitam até certo ponto a absorção e retenção de água.

O freqüente trânsito de maquinário e implementos para a incorporação e aeração do sistema, ocasionou certa compactação e conseqüente diminuição no tamanho dos poros, aumentando a quantidade de microporos (tabela 15).

As modificações físico-químicas provocadas pela adição de resíduos oleosos, resultaram em diminuição nas densidades real e aparente do solo da área 4 (tabela 16). Devido a característica de fácil volatilização de alguns componentes do resíduo oleoso, geralmente chamados de óleos leves, o aumento de temperatura na superfície do solo da área 4 promovendo a volatilização destes compostos, pode ter interferido negativamente para o desenvolvimento das plantas (BOSSERT; BARTHA, 1984).

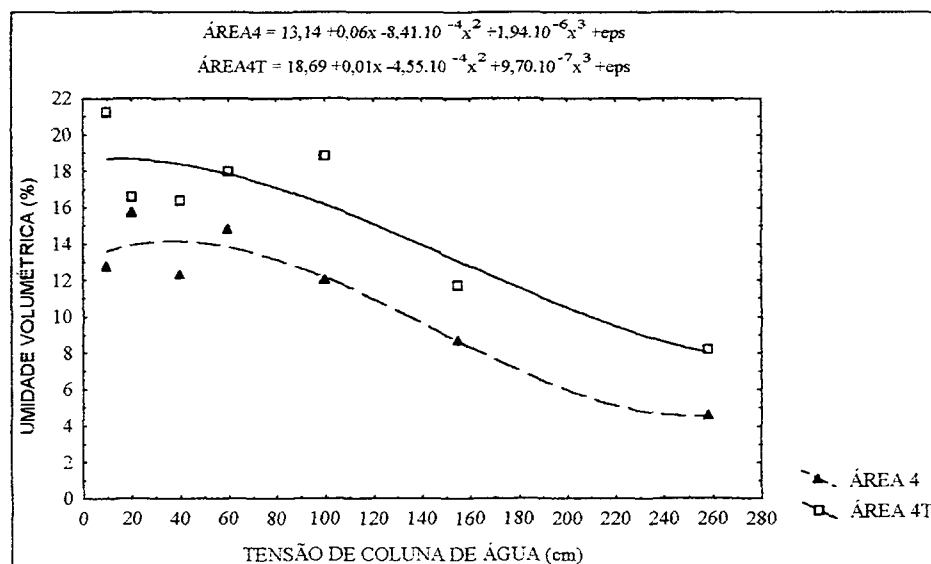
A tabela 17 mostra os conteúdos de argila, silte e areia na área contaminada e testemunha, podendo ambas as áreas serem classificadas como solos de textura franco-argilosa (EMBRAPA, 1979). Variáveis como textura do solo, temperatura e umidade foram testadas em diferentes níveis por BROWN; DONNELLY (1983), obtendo melhores resultados na degradação de resíduos de refinarias com substrato areno argiloso a 30°C e 33KPa de capacidade de campo.

FIGURA 19 - CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO DA ÁREA 4 E ÁREA 4T EM CONDIÇÕES DE CAMPO



NOTA : Cada ponto representa um grupamento de 5 amostras.

FIGURA 20 - CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO DA ÁREA 4 E ÁREA 4T EM CONDIÇÕES DE TFSA (terra fina seca ao ar)



Nota : Cada ponto representa um grupamento de 5 amostras.

TABELA 15 - MICROPOROSIDADE DO SOLO (%)

	ÁREA 4	ÁREA 4T
Média (%) <sup>(a)</sup>	51,31 ±7,53	48,53 ±2,74
CV (%) <sup>(b)</sup>	14,67	5,64

NOTA : <sup>(a)</sup> Média de 10 amostras; <sup>(b)</sup> Coeficiente de variação.

TABELA 16 -MÉDIA DAS DENSIDADES APARENTE  
( $\mu_{ap}$ ) E REAL DO SOLO ( $\mu_{re}$ )

DENSIDADE	ÁREA 4	ÁREA 4T
$\mu_{ap}$	1,04 (8,6) <sup>(a)</sup>	1,41 (6,6)
$\mu_{re}$	2,04 (3,5)	2,49 (4,6)

NOTA : <sup>(a)</sup> Valores entre parenteses representam os coeficientes de variação (%)

TABELA 17 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO

ÁREA EXPERIMENTAL	AREIA %	SILTE %	ARGILA %
Área 4	36	34	30
Área 4T	38	30	32

#### 5.4 EFEITO NA FERTILIDADE DO SOLO

Na tabela 18 são mostradas as análises químicas das duas áreas experimentais. O aumento na quantidade de carbono na área com borras oleosas (área 4) pode ser um efeito da assimilação do carbono orgânico por microrganismos transformado-o em biomassa microbiana (JENKINSON, 1981), gás carbônico e ainda sintetizando em outros compostos como metano, ácidos orgânicos e álcoois. Estima-se que 20 a 40% do carbono do substrato seja assimilado pelos microrganismos, sendo o restante convertido nos compostos citados e que 50% da nova biomassa formada seja constituída de C (ALEXANDER, 1980).

Possivelmente, a biodegradação do material por microrganismos, promoveu até certo ponto, um aumento no teor de fósforo inorgânico através da mineralização do fósforo orgânico proveniente dos compostos orgânicos dos resíduos (ALEXANDER, 1980; MALAVOLTA, 1976;

proveniente dos compostos orgânicos dos resíduos (ALEXANDER, 1980; MALAVOLTA, 1976; PANIGRAHI; KONAR, 1992). Entretanto, é possível que os resíduos promoveram uma interferência química na ação do extrator utilizado para a determinação do fósforo. Este fator pode ter contribuído significativamente na análise do fósforo, super estimando a quantidade do elemento em relação ao valor real da amostra (tabela 18).

As alterações nos teores das bases trocáveis  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^+$  da área 4 (tabela 18), provavelmente também sejam devido à interferência dos resíduos no extrator, similar àquela apresentada na determinação do fósforo. Por outro lado, parte da redução da quantidade das bases, pode, em hipótese, ser um efeito da lixiviação causada pela formação de gás carbônico da atividade respiratória microbiana. Essa diminuição na quantidade de bases trocáveis, ocasiona a formação da acidez e conseqüente redução no pH do solo (MALAVOLTA, 1976).

As equações abaixo, adaptadas de MALAVOLTA (1976), explicam este processo:

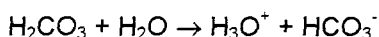
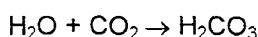


TABELA 18 - ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO CONTAMINADO (ÁREA 4) E SOLO TESTEMUNHA (ÁREA 4T)

ÁREA	pH	$\text{Al}^{+3}$	H + Al	$\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$	$\text{Ca}^{+2}$	$\text{K}^+$	CTC <sup>(a)</sup>	P	C	m <sup>(b)</sup>	V <sup>(c)</sup>
EXPERIMENTAL	CaCl	cmol/dm <sup>3</sup>						mg/dm <sup>3</sup>	g/dm <sup>3</sup>	%	
Área 4	5,9	0,0	4,3	12,6	6,2	0,07	17,0	28,0	24,3	0,0	74,7
Área 4T	6,1	0,0	3,0	28,7	20,7	0,35	32,1	8,0	6,9	0,0	90,6

NOTA : <sup>(a)</sup> CTC: Capacidade de troca catiônica; <sup>(b)</sup> m: Saturação de alumínio ; <sup>(c)</sup> V: Saturação de bases.

## 5.5 QUANTIDADES ESTIMADAS DA FRAÇÃO ORGÂNICA NAS PARCELAS DE AROEIRA, CASUARINA E IPÊ AMARELO

Nas parcelas das três espécies selecionadas para a determinação das quantidades estimadas da fração orgânica, composta por compostos oleosos provenientes dos resíduos, notou-se

certa heterogeneidade nos conteúdos de óleos dentro da mesma espécie e entre as espécies (tabela 19).

Os teores da fração orgânica oleosa em todas as parcelas foram decrescendo em função do tempo de plantio, com exceção de uma parcela de casuarina e uma parcela de ipê (tabela 20). Esta redução é devido principalmente à atividade da população microbiana adaptada ao substrato oleoso, visto que, aos 20 meses de desenvolvimento (600dias) as plantas ainda não possuíam biomassa aérea e radicial suficiente para iniciar um processo de ciclagem que viesse a sustentar uma atividade microbiana hábil para degradação desta matéria orgânica.

TABELA 19 - QUANTIDADES ESTIMADAS DE FRAÇÃO ORGÂNICA ADICIONADA (%) (composto oleoso) NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA E CASUARINA AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO

IDENTIFICAÇÃO DAS PARCELAS	399 dias	525 dias	600 dias
Ipê 38	15,49 ab <sup>(a)(b)</sup>	15,26 b	12,95 b
Ipê 5	9,85 g	12,07 g	6,79 f
Ipê 18	13,70 e	13,11 f	11,39 d
Ipê 52	16,26 a	16,10 a	15,80 a
Aroeira 23	14,48 de	14,49 d	13,01 b
Aroeira 25	15,09 bcd	14,78 cd	11,12 d
Aroeira 27	14,51 cde	14,07 e	12,68 b
Aroeira 49	11,41 f	10,97 h	9,76 e
Casuarina 21	15,39 ab	13,17 f	12,39 c
Casuarina 40	14,47 de	15,42 b	12,87 b
Casuarina 41	15,90 ab	14,62 d	12,78 b
Casuarina 7	6,03 h	5,51 i	5,51 g

NOTA : <sup>(a)</sup> Números da mesma coluna seguidos de letras iguais não são significativamente diferentes (teste de Tukey, com  $p < 0,05$ ). <sup>(b)</sup> Cada valor representa a média de 3 repetições de uma amostra composta.

TABELA 20 - DECRÉSCIMO DE FRAÇÃO  
ORGÂNICA OLEOSA (%) EM  
FUNÇÃO DO TEMPO

MÉDIA TOTAL DE MATERIAL ÓLEOSO(%)	
399 dias	13,55 a
525 dias	13,30 a
600 dias	11,42 b

NOTA : Números acompanhados da mesma  
letra são estatisticamente iguais (teste  
Tukey  $p < 0,05$ )

## 5.6 ANÁLISE MICROBIOLÓGICA DO SOLO

A eliminação de  $\text{CO}_2$  pela população microbiana do solo onde foram adicionados os resíduos (área 4), foi maior do que na área testemunha (área 4T) e decrescente em função do tempo de plantio das mudas (tabela 21). Possivelmente, a atividade respiratória dos microrganismos está relacionada com a disponibilidade de matéria orgânica proveniente dos resíduos. À medida que os resíduos são degradados, a atividade respiratória da área 4 tendeu a reduzir-se pela diminuição da matéria orgânica.



TABELA 21 - ATIVIDADE RESPIRATÓRIA MICROBIANA (mg de CO<sub>2</sub>/100g de solo seco) DO SOLO DA ÁREA 4 (CONTAMINADA) E ÁREA 4T (TESTEMUNHA) AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO

ÁREA 4				ÁREA 4T			
Parcela	399 dias	525 dias	600 dias	Parcela	399 dias	525 dias	600 dias
Ipê 38	21,80 <sup>(a)</sup>	22,70	18,78	Ipê 4	16,18	5,00	3,11
Ipê 5	9,40	11,24	4,00	Ipê 9	4,73	4,22	3,08
Ipê 18	22,19	29,12	11,86	Ipê 38	4,20	3,24	3,49
Ipê 52	15,47	15,82	8,29	Ipê 50	3,00	4,70	2,60
MÉDIA DE IPÊ	17,21ab <sup>(b)</sup>	19,72a	10,73ab		7,02bc	4,29c	3,07c
Aroeira 23	22,56	23,16	14,99	Aroeira 12	0,24	6,55	2,16
Aroeira 25	18,46	14,15	8,64	Aroeira 27	6,78	3,38	3,68
Aroeira 27	21,83	17,87	9,27	Aroeira 32	6,01	2,36	2,09
Aroeira 49	16,91	15,67	6,79	Aroeira 48	0,91	4,02	1,08
MÉDIA DE AROEIRA	19,94a	17,71a	9,92b		3,48bc	4,07bc	2,25c
Casuarina 21	18,19	13,29	7,22	Casuarina 18	4,27	2,84	2,16
Casuarina 40	15,82	20,12	14,65	Casuarina 37	3,88	1,25	2,05
Casuarina 41	21,36	20,46	6,94	Casuarina 41	4,93	3,58	3,49
Casuarina 7	19,05	15,46	8,10	Casuarina 51	4,64	5,17	1,85
MÉDIA DE CASUARINA	18,60a	17,33a	9,22b		4,43bc	3,21c	2,38c
MÉDIA TOTAL	18,58a	18,25a	9,96b		4,98c	3,85c	2,57c

NOTA : <sup>(a)</sup> Cada valor representa a média de 4 repetições. <sup>(b)</sup> Médias da mesma linha seguidas de letras iguais são significativamente iguais (teste de Tukey, com p<0,05).

Aos 600 dias após o plantio, a comparação das médias mostra uma significativa redução na atividade respiratória do solo da área 4. Geralmente, num solo agrícola e em condições de laboratório ela é cerca de 5 a 50 mg de CO<sub>2</sub> por Kg de solo (ALEXANDER, 1980). A produção de CO<sub>2</sub> pela população microbiana do solo da área 4 teve correlação positiva significativa (p<0,05) com a quantidade da fração oleosa dos resíduos no solo (anexo 24), que disponibiliza maior quantidade de carbono orgânico como substrato aos microrganismos. Teoricamente, a ação do CO<sub>2</sub> liberado pela população microbiana é evidenciada pela liberação de sais solúveis e diminuição do pH (tabela 18) (PURI; UPPAL, 1937; PURI; ASGHAR, 1938). Entretanto este efeito pouco evidenciado pela baixa correlação do pH do solo da área 4 com a produção de CO<sub>2</sub> e a população de fungos e bactérias (anexo 24). O fato da atividade respiratória da população microbiana estar relacionada com a transformação do carbono orgânico dos resíduos em CO<sub>2</sub> e biomassa microbiana, sugere a utilização da biorremediação para a degradação de resíduos oleosos através da população

microbiana do solo (AMADI; ABBEY; NMA, 1996). As tabelas 22 e 23 mostram a contagem de colônias de fungos e bactérias feita nas áreas 4 e 4T aos 399, 525 e 600 dias após o plantio.

Conforme mostra a tabela 24, a quantidade total de colônias de fungos na área 4 (área contaminada) foi maior do que na área testemunha aos 600 dias após o plantio, enquanto que a contagem de colônias bacterianas foi estatisticamente igual nas duas áreas experimentais.

TABELA 22 - CONTAGEM DE FUNGOS E BACTÉRIAS (colônias  $g^{-1}$  de solo seco) DO SOLO DA ÁREA 4 NAS PARCELAS DE IPÊ, CASUARINA, AROEIRA, AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO

399 dias pós plantio								
parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria
ipê 5	$9,0 \times 10^4$	$3,5 \times 10^6$	casuarina 7	$1,3 \times 10^4$	$7,5 \times 10^7$	aroeira 23	$7,5 \times 10^4$	$5,2 \times 10^7$
ipê 18	$8,2 \times 10^4$	$7,2 \times 10^6$	casuarina 21	$1,3 \times 10^5$	$1,1 \cdot 10^8$	aroeira 25	$8,9 \times 10^4$	$6,0 \times 10^7$
ipê 38	$8,3 \times 10^4$	$6,3 \cdot 10^6$	casuarina 40	$7,8 \times 10^4$	$8,2 \times 10^7$	aroeira 27	$9,8 \times 10^5$	$8,5 \times 10^8$
ipê 52	$1,0 \times 10^5$	$9,6 \times 10^7$	casuarina 41	$6,7 \times 10^4$	$8,3 \cdot 10^6$	aroeira 49	$6,3 \times 10^4$	$1,0 \times 10^9$
525 dias pós plantio								
parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria
ipê 5	$9,0 \times 10^4$	$4,7 \times 10^9$	casuarina 7	$5,6 \times 10^4$	$3,7 \times 10^9$	aroeira 23	$5,4 \times 10^4$	$6,6 \times 10^9$
ipê 18	$5,0 \times 10^4$	$4,3 \times 10^9$	casuarina 21	$7,2 \times 10^4$	$3,9 \times 10^9$	aroeira 25	$7,4 \times 10^5$	$4,6 \times 10^9$
ipê 38	$4,0 \times 10^4$	$7,1 \times 10^9$	casuarina 40	$1,8 \times 10^4$	$4,8 \times 10^9$	aroeira 27	$8,0 \times 10^4$	$4,5 \times 10^9$
ipê 52	$8,0 \times 10^4$	$5 \times 10^9$	casuarina 41	$6,6 \times 10^4$	$4,7 \times 10^9$	aroeira 49	$6,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^8$
600 dias pós plantio								
parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria
ipê 5	$4,7 \times 10^5$	$5,5 \times 10^9$	casuarina 7	$4,5 \times 10^5$	$1,6 \times 10^8$	aroeira 23	$3,8 \times 10^5$	$7,6 \times 10^9$
ipê 18	$3,9 \times 10^4$	$1,5 \times 10^9$	casuarina 21	$7,2 \times 10^5$	$2,2 \times 10^9$	aroeira 25	$2,7 \times 10^5$	$7,1 \times 10^9$
ipê 38	$4,6 \times 10^5$	$3,2 \times 10^8$	casuarina 40	$5,2 \times 10^5$	$4,6 \times 10^8$	aroeira 27	$6,6 \times 10^5$	$1,0 \times 10^9$
ipê 52	$1,1 \times 10^5$	$2,1 \times 10^8$	casuarina 41	$4,8 \times 10^5$	$8,6 \times 10^9$	aroeira 49	$8,9 \times 10^5$	$2,5 \times 10^9$

TABELA 23 - CONTAGEM DE FUNGOS E BACTÉRIAS (colônias g<sup>-1</sup> de solo seco) DO SOLO DA ÁREA 4T AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO

399 dias pós plantio								
parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria
ipê 4	2,5x10 <sup>5</sup>	2,4x10 <sup>8</sup>	casuarina 18	4,8x10 <sup>4</sup>	7,9x10 <sup>7</sup>	aroeira 12	1,1x10 <sup>5</sup>	1,0x10 <sup>6</sup>
ipê 9	5,8x10 <sup>4</sup>	1,0x10 <sup>8</sup>	casuarina 37	5,0x10 <sup>3</sup>	1,1x10 <sup>8</sup>	aroeira 27	5,6x10 <sup>4</sup>	2,3x10 <sup>7</sup>
ipê 38	8,2x10 <sup>4</sup>	3,0x10 <sup>8</sup>	casuarina 41	4,6x10 <sup>4</sup>	8,9x10 <sup>7</sup>	aroeira 32	1,0x10 <sup>4</sup>	4,6x10 <sup>7</sup>
ipê 50	3,4x10 <sup>5</sup>	1,9x10 <sup>8</sup>	casuarina 51	2x10 <sup>5</sup>	8,3.10 <sup>6</sup>	aroeira 48	7,0x10 <sup>4</sup>	4,9x10 <sup>7</sup>
525 dias pós plantio								
parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria
ipê 4	1,04x10 <sup>5</sup>	6,7x10 <sup>9</sup>	casuarina 18	6,2x10 <sup>4</sup>	3,7x10 <sup>9</sup>	aroeira 12	5x10 <sup>4</sup>	6,6x10 <sup>9</sup>
ipê 9	1,44x10 <sup>5</sup>	4,6x10 <sup>9</sup>	casuarina 37	8,6x10 <sup>4</sup>	3,9x10 <sup>9</sup>	aroeira 27	1,04 x10 <sup>5</sup>	6,4x10 <sup>9</sup>
ipê 38	7,6x10 <sup>4</sup>	5,2x10 <sup>9</sup>	casuarina 41	3,4x10 <sup>4</sup>	4,8x10 <sup>9</sup>	aroeira 32	8,0 x10 <sup>4</sup>	7,1x10 <sup>8</sup>
ipê 50	1,54x10 <sup>5</sup>	1,9x10 <sup>9</sup>	casuarina 51	6,2x10 <sup>4</sup>	4,7x10 <sup>9</sup>	aroeira 48	9,8 x10 <sup>4</sup>	8,9x10 <sup>9</sup>
600 dias pós plantio								
parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria	parcela	Fungo	Bactéria
ipê 4	8,0x10 <sup>4</sup>	7,4x10 <sup>9</sup>	casuarina 18	2,0x10 <sup>5</sup>	9,6x10 <sup>8</sup>	aroeira 12	8,9x10 <sup>4</sup>	6,6x10 <sup>8</sup>
ipê 9	7,7x10 <sup>4</sup>	8,1x10 <sup>9</sup>	casuarina 37	1,0x10 <sup>5</sup>	7,3 x10 <sup>9</sup>	aroeira 27	2,3x10 <sup>5</sup>	4,5x10 <sup>9</sup>
ipê 38	3,1x10 <sup>4</sup>	1x10 <sup>9</sup>	casuarina 41	1,3x10 <sup>5</sup>	5,7 x10 <sup>9</sup>	aroeira 32	1,5x10 <sup>5</sup>	8,7x10 <sup>8</sup>
ipê 50	1,0x10 <sup>5</sup>	4,7x10 <sup>9</sup>	casuarina 51	1,1x10 <sup>5</sup>	1,1 x10 <sup>9</sup>	aroeira 48	1x10 <sup>5</sup>	7,0x10 <sup>8</sup>

TABELA 24 - MÉDIAS TOTAIS DE FUNGOS E BACTÉRIAS NA ÁREA 4 E 4T AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO

	área 4		área 4T	
	fungo	bactéria	fungo	bactéria
399 dias	1,5x10 <sup>5</sup> (b)	1,9x10 <sup>8</sup> [b]	1,0x10 <sup>5</sup> (b)	1,7x10 <sup>8</sup> [b]
525 dias	6,1x10 <sup>4</sup> (b)	4,5x10 <sup>9</sup> [a]	8,7x10 <sup>4</sup> (b)	4,8x10 <sup>9</sup> [a]
600 dias	4,5x10 <sup>5</sup> (a)	3,0x10 <sup>9</sup> [a]	1,1x10 <sup>5</sup> (b)	3,5x10 <sup>9</sup> [a]

NOTA : Médias com letras iguais entre parênteses ou colchetes, são significativamente iguais (teste Tukey, p<0,05).

Possivelmente a população microbiana da área 4 tenderá a estabilizar-se à medida que o conteúdo da fração orgânica disponível seja degradado pelos próprios microrganismos do solo (KIRCHMANN; BERNAL, 1997). O número de colônias de fungos encontradas na área 4 e 4T aproxima-se daquelas citadas por ALEXANDER (1980) e que formaram populações acima de 10<sup>5</sup> colônias g<sup>-1</sup> de solo a partir de substratos contendo parafinas.

Cabe ressaltar que a competição por nutrientes entre as plantas e os microrganismos também pode-se considerar como uma variável que reduz a disponibilidade dos nutrientes às plantas (HUNGRIA; URQUIAGA, 1992).

## 6 CONCLUSÕES

Canafístula, casuarina e cupressus, foram as espécies mais tolerantes aos resíduos aplicados na área 4 e podem ser consideradas aptas para o processo de biorremediação em áreas contaminadas com borras oleosas. Acácia, eucalipto e bracatinga foram as espécies que mais cresceram na área contaminada, mas são necessários estudos silviculturais (adubação, preparo do solo e tratos fitossanitários) para reduzir a mortalidade.

Espécies que obtiveram taxas de sobrevivência superior a 50% (eucalipto, cupressus, casuarina, ipê amarelo, aroeira, canafístula, guabiroba) possuem potencial para a revegetação de áreas contaminadas com resíduos oleosos.

Canafístula, casuarina e cupressus foram também as espécies mais adequadas para a cobertura da “área de empréstimo” da REPAR (área não contaminada). As demais espécies também tiveram boas taxas de sobrevivência, exceto a acácia negra, bracatinga, tipuana, erva-mate e ipê que foram consideradas inaptas para a revegetação da área de empréstimo.

As borras oleosas alteraram as propriedades físicas do solo da área contaminada, reduzindo a capacidade de retenção de água, aumentando a quantidade de microporos devido ao manejo intensivo da área e diminuindo as densidades reais e aparente do solo

Casuarina foi a espécie que mais acumulou elementos inorgânicos, mas nenhuma das três espécies estudadas pode ser classificada como hiperacumuladora de metais pesados. É recomendável que sejam testadas espécies forrageiras que podem mais rapidamente fornecer matéria orgânica vegetal e acelerar o processo de fitorremediação.

Casuariana produziu a maior quantidade de biomassa na área contaminada, seguida de aroeira e ipê amarelo. Na área tesmunha, a aroeira foi a espécie que mais produziu biomassa, seguida de casuarina e ipê amarelo. A aroeira apresentou maiores diâmetros de colo em relação à casuarina e ipê, tanto na área contaminada quanto na área testemunha.

A quantidade de fungos aumentou na área 4 (contaminada) devido principalmente à maior disponibilidade de carbono orgânico proveniente dos resíduos, enquanto que a quantidade de bactérias na área 4 foi estatisticamente igual ao da área 4T.

A atividade respiratória microbiana na área contaminada, foi cerca de quatro vezes maior do que na área testemunha e teve correlação positiva significativa com o conteúdo da fração orgânica do solo, evidenciando a degradação dos resíduos oleosos através da população microbiana do solo e caracterizando o processo de biorremediação da área.

## ANEXOS

ANEXO 1.- ANÁLISES DE VARIÂNCIAS DA ALTURA MÉDIA (cm), INCREMENTO MÉDIO (cm) AOS 918 DIAS APÓS O PLANTIO NA ÁREA 4 E ÁREA 4T

ÁREA EXPERIMENTAL	FATOR DE VARIAÇÃO	G.L	QM	SQ	F	p(<0,05)
L						
ÁREA 4	Altura	12	7766,806	93201,675	4,049**	0,001
	Resíduo	33	1918,116	63297,812		
ÁREA 4T	Altura	9	5300,795	47707,159	40,581**	0,000
	Resíduo	29	130,623	3788,074		
ÁREA 4	Incremento	12	3583,364	43000,372	1,803 ns	0,089
	Resíduo	33	1987,756	65595,947		
ÁREA 4T	Incremento	9	1558,052	14022,472	13,006**	0,000
	Resíduo	26	119,798	3114,750		

NOTA : \*\* Significante ao nível de 5% pelo teste f; ns - Não significativo.

ANEXO 2 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR MÉDIO DE METAIS NÃO ESSENCIAIS,  
MICRONUTRIENTES, MACRONUTRIENTES NA RAIZ DO IPÊ, AROEIRA E CASUARINA DA  
ÁREA 4

FATOR DE VARIAÇÃO	G.L	QM	SQ	F	p(<0,05)
Na	2	45037,781	90075,563	233,479**	0,000
Resíduo	9	192,898	1736,086		
Ni	2	282,518	565,036	3,895 ns	0,060
Resíduo	9	72,533	652,800		
V	2	646,867	1293,735	8,651**	0,008
Resíduo	9	74,777	672,995		
Zn	2	73259,902	146519,805	5,056**	0,034
Resíduo	9	14488,641	130397,768		
Al	2	3914697,552	7829395,104	6,219**	0,020
Resíduo	9	629498,971	5665490,740		
Cu	2	813,617	1627,234	1,110 ns	0,371
Resíduo	9	733,242	6599,179		
Fe	2	443024,891	886049,781	8,898**	0,007
Resíduo	9	49789,593	448106,336		
Pb	2	16,993	33,986	1,000 ns	0,405
Resíduo	9	16,993	152,939		
K	2	289503,656	579007,311	12,295**	0,003
Resíduo	9	23546,162	211915,457		
Cr	2	214,180	428,360	3,069 ns	0,096
Resíduo	9	69,780	628,024		
Ca	2	4136148,561	8272297,121	2,246 ns	0,162
Resíduo	9	1841762,823	16575865,41		
Mg	2	448401,745	896803,490	4,084 ns	0,055
Resíduo	9	109782,525	988042,722		

NOTA : \*\* Significante ao nível de 5% pelo teste f; ns - Não significativo.



ANEXO 3 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR MÉDIO DE METAIS NÃO ESSENCIAIS,  
MICRONUTRIENTES, MACRONUTRIENTES NO CAULE DO IPÊ, AROEIRA E CASUARINA DA  
ÁREA 4

FATOR DE VARIAÇÃO	G.L	QM	SQ	F	p(<0,05)
Na	2	25.509,750	51019,500	5,932**	0,022
Resíduo	9	4299,705	38697,340		
Ni	2	23,948	47,895	1,991ns	0,192
Resíduo	9	12,022	108,206		
V	2	185,481	370,962	0,979ns	0,412
Resíduo	9	189,424	1704,818		
Zn	2	112,469	224,94	0,159ns	0,854
Resíduo	9	703,553	6331,977		
Al	2	426622,122	853244,244	5,831**	0,023
Resíduo	9	73155,577	658.400,19		
Cu	2	112,118	224,236	0,708ns	0,517
Resíduo	9	158,176	1.423,590		
Fe	2	485291,621	970583,24	38,304**	0,000
Resíduo	9	12669,194	114.022,75		
K	2	71789,761	143579,523	10,113**	0,004
Resíduo	9	7098,497	63.886,480		
Cr	2	33,685	67,369	0,307ns	0,742
Resíduo	9	109,539	985,860		
Ca	2	11370977,7	22741955,3	5,519**	0,027
Resíduo	9	2060281,24	18542531,1		
Mg	2	422920,077	845840,154	5,738**	0,024
Resíduo	9	73703,141	663328,272		

NOTA : \*\* Significante ao nível de 5% pelo teste f; ns - Não significativo.

ANEXO 4 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR MÉDIO DE METAIS NÃO ESSENCIAIS,  
MICRONUTRIENTES, MACRONUTRIENTES NO FOLHA DO IPÊ, AROEIRA E  
CASUARINA DA ÁREA 4

FATOR DE VARIAÇÃO	G.L	QM	SQ	F	p(<0,05)
Na	2	21684,632	43369,264	1,297ns	0,320
Resíduo	9	16719,258	150473,320		
Ni	2	50,704	101,408	0,549ns	0,595
Resíduo	9	92,273	830,458		
V	2	133,697	267,395	0,408ns	0,677
Resíduo	9	327,774	2949,970		
Zn	2	12374,216	24748,432	4,815**	0,038
Resíduo	9	2569,914	23129,230		
Al	2	152723,951	305447,903	1,709ns	0,235
Resíduo	9	89378,358	804405,218		
Cu	2	448,993	897,985	4,060ns	0,055
Resíduo	9	110,584	995,253		
Fe	2	204325,716	408651,432	6,914**	0,015
Resíduo	9	29552,262	265970,361		
Pb	2	1,068	2,136	1,000ns	0,405
Resíduo	9	1,068	9,612		
K	2	207110,010	414220,020	2,642ns	0,125
Resíduo	9	78387,916	705491,244		
Cr	2	54,001	108,003	1,614ns	0,252
Resíduo	9	33,463	301,170		
Ca	2	18658723,89	37317447,79	5,527**	0,027
Resíduo	9	3375678,564	30381107,07		
Mg	2	41665,066	83330,133	0,398ns	0,683
Resíduo	9	104704,929	942344,363		

NOTA : \*\* Significante ao nível de 5% pelo teste f; ns - Não significativo.

ANEXO 5 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR MÉDIO DE METAIS NÃO ESSENCIAIS,  
MICRONUTRIENTES, MACRONUTRIENTES NO RAIZ DO IPÊ, AROEIRA E CASUARINA DA  
ÁREA 4T

CAUSA DA VARIAÇÃO	G.L	QM	SQ	F	p(<0,05)
Na	2	16636,613	33273,225	21,047**	0,000
Resíduo	9	790,437	7113,930		
V	2	4,432	8,863	0,546ns	0,598
Resíduo	9	8,122	73,102		
Zn	2	422,877	845,754	6,247**	0,020
Resíduo	9	67,688	609,192		
Al	2	8322703,35	16645406,70	3,908ns	0,060
Resíduo	9	2129728,73	19167558,57		
Cu	2	216,348	432,696	4,073ns	0,055
Resíduo	9	53,116	478,040		
Fe	2	288655,284	577310,568	5,399**	0,029
Resíduo	9	53466,948	481202,533		
K	2	316556,228	633112,457	70,090**	0,000
Resíduo	9	4516,443	40647,986		
Cr	2	38,880	77,760	4,584**	0,042
Resíduo	9	8,482	76,340		
Ca	2	4943703,328	9887406,657	2,358ns	0,150
Resíduo	9	2096341,258	18867071,33		
Mg	2	238996,298	477992,596	2,737ns	0,118
Resíduo	9	87310,075	785790,671		

NOTA : \*\* Significante ao nível de 5% pelo teste f, ns - Não significativo.

ANEXO 6 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR MÉDIO DE METAIS NÃO ESSENCIAIS,  
MICRONUTRIENTES, MACRONUTRIENTES NO CAULE DO IPÊ, AROEIRA E CASUARINA  
DA ÁREA 4T

CAUSA DA VARIAÇÃO	G.L	QM	SQ	F	p(<0,05)
Na	2	1910,844	3821,689	11,341**	0,003
Resíduo	9	168,488	1516,396		
Zn	2	249,113	498,227	15,103**	0,001
Resíduo	9	16,4937944	148,444		
Al	2	856145,870	1712291,739	9,981**	0,005
Resíduo	9	85777,415	771996,735		
Cu	2	152,171	304,342	1,500ns	0,273
Resíduo	9	101,410	912,696		
Fe	2	118715,796	237431,592	7,642**	0,011
Resíduo	9	15533,313	139799,820		
K	2	26862,389	53724,778	55,499**	0,000
Resíduo	9	484,014	4356,129		
Cr	2	7,954	15,909	2,991ns	0,100
Resíduo	9	2,659	23,932		
Ca	2	316405,649	632811,298	0,248ns	0,785
Resíduo	9	1274738,87	11.472.650		
Mg	2	35974,721	71949,442	0,644ns	0,547
Resíduo	9	55796,851	502171,663		

NOTA : \*\* Significante ao nível de 5% pelo teste f; ns - Não significativo.

ANEXO 7 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO TEOR MÉDIO DE METAIS NÃO ESSENCIAIS,  
MICRONUTRIENTES, MACRONUTRIENTES NAS FOLHAS DO IPÊ, AROEIRA E  
CASUARINA DA ÁREA 4T

CAUSAS DA VARIAÇÃO	G.L	QM	SQ	F	p(<0,05)
Na	2	48017,652	96035,304	37,795**	0,000
Resíduo	9	1270,468	11434,213		
Ni	2	4,128	8,25521667	0,921ns	0,432
Resíduo	9	4,478	40,302		
V	2	18,177	36,355	0,680ns	0,530
Resíduo	9	26,731	240,5848		
Zn	2	1934,403	3868,80665	23,227**	0,000
Resíduo	9	83,282	749,541		
Al	2	3928042,16	7856084,31	2,224ns	0,164
Resíduo	9	1766185,86	15895672,7		
Cu	2	994,108	1988,215	3,435ns	0,077
Resíduo	9	289,342	2604,080		
Fe	2	682079,963	1364159,926	4,544**	0,043
Resíduo	9	150075,17	1350676,53		
Pb	2	1,056	2,112	1,000ns	0,405
Resíduo	9	1,056	9,505		
K	2	129958,201	259916,402	30,371**	0,000
Resíduo	9	4278,949	38510,546		
Cr	2	0,0675	0,135	1,000ns	0,405
Resíduo	9	0,0675	0,6075		
Ca	2	36708478,9	73416957,8	10,850**	0,003
Resíduo	9	3383070,68	30447636,1		
Mg	2	496539,565	993079,129	1,340ns	0,309
Resíduo	9	370486,167	3334375,5		

NOTA : \*\* Significante ao nível de 5% pelo teste f; ns - Não significativo.

ANEXO 8 - ANÁLISES DE VARIÂNCIAS DAS QUANTIDADES DE ÓLEOS (%) NAS PARCELAS DE IPÊ, AROEIRA E CASUARINA AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO

CAUSA DA VARIAÇÃO	G.L	QM	SQ	F	p
399 DIAS					
% óleo	11	27,236	299,592	284,552**	0,000
Resíduo	24	0,096	2,297		
525 DIAS					
% óleo	11	24,511	269,624	1340,017**	0,000
Resíduo	24	0,018	0,439		
600 DIAS					
% óleo	11	24,487	269,360	797,199**	0,000
Resíduo	24	0,031	0,737		

NOTA : \*\* Significante ao nível de 5% pelo teste f; ns - não significativo.

ANEXO 9 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO DECRÉCIMO DA QUANTIDADE DE ÓLEO EM FUNÇÃO DO TEMPO

CAUSA DA VARIAÇÃO	G.L	QM	SQ	F	p
% óleo/tempo	9	2,299	20,695	4,392**	0,000
Resíduo	98	0,524	51,305		

NOTA : \*\* Significante ao nível de 5% pelo teste f; ns - Não significativo.

ANEXO 10 - QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE OS ACÚMULOS DE METAIS NAS RAÍZES DE IPÊ, PH DO SOLO, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO DE IPÊ, FRAÇÃO OLEOSA DO SOLO (%), PESO SECO DAS RAÍZES DE IPÊ

	Na <sup>(a)</sup>	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	K	Cr	Ca	Mg	pH	H <sup>(b)</sup>	Ø <sup>(c)</sup>	▲ <sup>(d)</sup>	MS <sup>(e)</sup>
Na	1,000	-0,697	0,348	-0,579	-0,917	-0,331	0,299	-0,068	-0,446	0,312	0,351	-0,207	0,519	-0,058	0,624	-0,919
Ni	-0,697	1,000	0,429	0,687	0,437	0,907	0,016	0,709	-0,194	0,407	0,427	0,499	-0,281	-0,060	-0,950	0,718
V	0,348	0,429	1,000	0,156	-0,578	0,770	0,414	0,835	-0,826	0,918	0,999	0,407	0,302	-0,134	-0,462	-0,211
Zn	-0,579	0,687	0,156	1,000	0,219	0,551	-0,692	0,674	0,373	0,435	0,189	-0,287	-0,860	-0,727	-0,425	0,303
Al	-0,917	0,437	-0,578	0,219	1,000	0,042	-0,109	-0,304	0,454	-0,638	-0,594	0,287	-0,271	0,370	-0,456	0,919
Cu	-0,331	0,907	0,770	0,551	0,042	1,000	0,213	0,887	-0,528	0,712	0,767	0,551	-0,049	-0,095	-0,890	0,413
Fe	0,299	0,016	0,414	-0,692	-0,109	0,213	1,000	-0,072	-0,851	0,023	0,370	0,854	0,954	0,830	-0,316	0,102
K	-0,068	0,709	0,835	0,674	-0,304	0,887	-0,072	1,000	-0,412	0,927	0,852	0,152	-0,250	-0,499	-0,589	0,019
CR	-0,446	-0,194	-0,826	0,373	0,454	-0,528	-0,851	-0,412	1,000	-0,543	-0,799	-0,722	-0,779	-0,420	0,397	0,124
Ca	0,312	0,407	0,918	0,435	-0,638	0,712	0,023	0,927	-0,543	1,000	0,936	0,046	-0,062	-0,516	-0,314	-0,336
Mg	0,351	0,427	0,999	0,189	-0,594	0,767	0,370	0,852	-0,799	0,936	1,000	0,365	0,262	-0,182	-0,444	-0,232
pH	-0,207	0,499	0,407	-0,287	0,287	0,551	0,854	0,152	-0,722	0,046	0,365	1,000	0,664	0,777	-0,744	0,564
H	0,519	-0,281	0,302	-0,860	-0,271	-0,049	0,954	-0,250	-0,779	-0,062	0,262	0,664	1,000	0,791	-0,018	-0,143
Ø	-0,058	-0,060	-0,134	-0,727	0,370	-0,095	0,830	-0,499	-0,420	-0,516	-0,182	0,777	0,791	1,000	-0,240	0,414
▲	0,624	-0,950	-0,462	-0,425	-0,456	-0,890	-0,316	-0,589	0,397	-0,314	-0,444	-0,744	-0,018	-0,240	1,000	-0,768
MS	-0,919	0,718	-0,211	0,303	0,919	0,413	0,102	0,019	0,124	-0,336	-0,232	0,564	-0,143	0,414	-0,768	1,000

NOTA : <sup>(a)</sup> Acúmulo de metais pesados na raiz (mg/kg da massa seca) <sup>(b)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(c)</sup> Ø - diâmetro de colo (mm) <sup>(d)</sup> ▲ - Teor de óleo (%) <sup>(e)</sup> MS - peso da massa seca da raiz (g).

ANEXO 11 - QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE OS ACÚMULOS DE METAIS NO CAULE DE IPÊ, PH DO SOLO, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO DE IPÊ, FRAÇÃO OLEOSA DO SOLO (%), PESO SECO DO CAULE DE IPÊ

	Na <sup>(a)</sup>	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	K	Cr	Ca	Mg	pH	H <sup>(b)</sup>	Ø <sup>(c)</sup>	▲ <sup>(d)</sup>	MS <sup>(e)</sup>
Na	1,000	-0,749	-0,161	-1,000	-0,788	0,425	-0,851	0,628	0,335	0,027	-0,067	0,234	0,852	0,668	0,475	0,107
Ni	-0,749	1,000	-0,467	0,762	0,996	-0,352	0,624	-0,398	-0,043	0,144	0,167	0,402	-0,418	-0,009	-0,875	-0,193
V	-0,161	-0,467	1,000	0,136	-0,445	-0,415	-0,071	-0,532	-0,717	-0,643	-0,571	-0,997	-0,607	-0,740	0,792	0,557
Zn	-1,000	0,762	0,136	1,000	0,801	-0,410	0,860	-0,612	-0,313	-0,005	0,088	-0,209	-0,838	-0,654	-0,497	-0,128
Al	-0,788	0,996	-0,445	0,801	1,000	-0,305	0,694	-0,376	-0,012	0,195	0,227	0,377	-0,441	-0,077	-0,881	-0,254
Cu	0,425	-0,352	-0,415	-0,410	-0,305	1,000	0,113	0,958	0,929	0,874	0,850	0,446	0,712	0,193	-0,121	-0,831
Fe	-0,851	0,624	-0,071	0,860	0,694	0,113	1,000	-0,134	0,174	0,480	0,568	0,008	-0,520	-0,616	-0,598	-0,601
K	0,628	-0,398	-0,532	-0,612	-0,376	0,958	-0,134	1,000	0,929	0,790	0,734	0,576	0,884	0,455	-0,097	-0,706
Cr	0,335	-0,043	-0,717	-0,313	-0,012	0,929	0,174	0,929	1,000	0,947	0,905	0,736	0,750	0,404	-0,443	-0,887
Ca	0,027	0,144	-0,643	-0,005	0,195	0,874	0,480	0,790	0,947	1,000	0,993	0,640	0,497	0,143	-0,569	-0,988
Mg	-0,067	0,167	-0,571	0,088	0,227	0,850	0,568	0,734	0,905	0,993	1,000	0,562	0,400	0,028	-0,564	-0,999
pH	0,234	0,402	-0,997	-0,209	0,377	0,446	0,008	0,576	0,736	0,640	0,562	1,000	0,664	0,777	-0,744	-0,545
H	0,852	-0,418	-0,607	-0,838	-0,441	0,712	-0,520	0,884	0,750	0,497	0,400	0,664	1,000	0,791	-0,018	-0,362
Ø	0,668	-0,009	-0,740	-0,654	-0,077	0,193	-0,616	0,455	0,404	0,143	0,028	0,777	0,791	1,000	-0,240	0,005
▲	0,475	-0,875	0,792	-0,497	-0,881	-0,121	-0,598	-0,097	-0,443	-0,569	-0,564	-0,744	-0,018	-0,240	1,000	0,576
MS	0,107	-0,193	0,557	-0,128	-0,254	-0,831	-0,601	-0,706	-0,887	-0,988	-0,999	-0,545	-0,362	0,005	0,576	1,000

NOTA : <sup>(a)</sup> Acúmulo de metais pesados no caule (mg/kg da massa seca) <sup>(b)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(c)</sup> Ø - Diâmetro de colo (mm) <sup>(d)</sup> ▲ - Teor de óleo (%) <sup>(e)</sup> MS - Peso da massa seca do caule (g).



ANEXO 12 - QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE METAIS NAS FOLHAS DE IPÊ, PH DO SOLO, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO DE IPÊ, FRAÇÃO OLEOSA DO SOLO (%), PESO SECO DAS FOLHAS DE IPÊ

	Na <sup>(a)</sup>	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	K	Cr	Ca	Mg	Ph	H <sup>(b)</sup>	Ø <sup>(c)</sup>	▲ <sup>(d)</sup>	MS <sup>(e)</sup>
Na	1,000	-0,964	0,513	-0,650	-0,985	-0,953	-0,333	0,828	0,743	-0,488	-0,215	-0,494	0,303	0,034	0,947	-0,972
Ni	-0,964	1,000	-0,408	0,821	0,994	0,919	0,162	-0,938	-0,557	0,647	0,038	0,402	-0,418	-0,009	-0,875	0,923
V	0,513	-0,408	1,000	0,072	-0,491	-0,247	-0,944	0,097	0,811	-0,482	0,274	-0,999	-0,656	-0,746	0,760	-0,698
Zn	-0,650	0,821	0,072	1,000	0,751	0,684	-0,375	-0,963	0,018	0,684	-0,167	-0,059	-0,718	-0,168	-0,449	0,544
Al	-0,985	0,994	-0,491	0,751	1,000	0,923	0,265	-0,893	-0,647	0,620	0,068	0,482	-0,335	0,032	-0,923	0,960
Cu	-0,953	0,919	-0,247	0,684	0,923	1,000	0,095	-0,849	-0,617	0,294	0,429	0,222	-0,540	-0,334	-0,816	0,857
Fe	-0,333	0,162	-0,944	-0,375	0,265	0,095	1,000	0,183	-0,822	0,175	-0,090	0,933	0,786	0,662	-0,610	0,522
K	0,828	-0,938	0,097	-0,963	-0,893	-0,849	0,183	1,000	0,241	-0,643	0,009	-0,099	0,663	0,178	0,652	-0,731
Cr	0,743	-0,557	0,811	0,018	-0,647	-0,617	-0,822	0,241	1,000	-0,130	-0,320	-0,781	-0,305	-0,218	0,875	-0,823
Ca	-0,488	0,647	-0,482	0,684	0,620	0,294	0,175	-0,643	-0,130	1,000	-0,737	0,516	0,002	0,604	-0,527	0,566
Mg	-0,215	0,038	0,274	-0,167	0,068	0,429	-0,090	0,009	-0,320	-0,737	1,000	-0,325	-0,377	-0,802	-0,083	0,074
Ph	-0,494	0,402	-0,999	-0,059	0,482	0,222	0,933	-0,099	-0,781	0,516	-0,325	1,000	0,664	0,777	-0,744	0,684
H	0,303	-0,418	-0,656	-0,718	-0,335	-0,540	0,786	0,663	-0,305	0,002	-0,377	0,664	1,000	0,791	-0,018	-0,080
Ø	0,034	-0,009	-0,746	-0,168	0,032	-0,334	0,662	0,178	-0,218	0,604	-0,802	0,777	0,791	1,000	-0,240	0,190
▲	0,947	-0,875	0,760	-0,449	-0,923	-0,816	-0,610	0,652	0,875	-0,527	-0,083	-0,744	-0,018	-0,240	1,000	-0,994
MS	-0,972	0,923	-0,698	0,544	0,960	0,857	0,522	-0,731	-0,823	0,566	0,074	0,684	-0,080	0,190	-0,994	1,000

NOTA : <sup>(a)</sup> Concentração de metais pesados nas folhas (mg/kg da massa seca) <sup>(b)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(c)</sup> Ø - Diâmetro de colo (mm) <sup>(d)</sup> ▲ - Teor de óleo (%) <sup>(e)</sup> MS - Peso da massa seca das folhas (g).

ANEXO 13 - QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE OS ACÚMULOS DE METAIS NAS RAÍZES DE AROEIRA, PH DO SOLO, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO DE AROEIRA, FRAÇÃO OLEOSA DO SOLO (%), PESO SECO DAS RAÍZES DE AROEIRA

	Na <sup>(a)</sup>	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	K	Cr	Ca	Mg	pH	H <sup>(b)</sup>	Ø <sup>(c)</sup>	▲ <sup>(d)</sup>	MS <sup>(e)</sup>
Na	1,000	-0,212	0,335	-0,998	0,209	0,211	-0,882	0,863	0,615	0,864	0,883	0,411	0,704	0,410	-0,240	0,278
Ni	-0,212	1,000	-0,119	0,183	-0,643	-0,901	0,642	-0,318	-0,794	-0,666	-0,559	-0,690	-0,679	-0,645	0,897	-0,500
V	0,335	-0,119	1,000	-0,379	0,817	0,521	-0,254	0,754	0,616	0,225	0,572	0,800	0,694	0,835	-0,537	0,913
Zn	-0,998	0,183	-0,379	1,000	-0,228	-0,206	0,864	-0,881	-0,614	-0,843	-0,884	-0,425	-0,710	-0,428	0,235	-0,306
Al	0,209	-0,643	0,817	-0,228	1,000	0,911	-0,417	0,636	0,850	0,411	0,626	0,975	0,828	0,977	-0,916	0,981
Cu	0,211	-0,901	0,521	-0,206	0,911	1,000	-0,564	0,514	0,898	0,575	0,638	0,918	0,822	0,895	-1,000	0,821
Fe	-0,882	0,642	-0,254	0,864	-0,417	-0,564	1,000	-0,792	-0,832	-0,999	-0,938	-0,604	-0,843	-0,579	0,584	-0,398
K	0,863	-0,318	0,754	-0,881	0,636	0,514	-0,792	1,000	0,819	0,767	0,948	0,766	0,905	0,779	-0,540	0,715
Cr	0,615	-0,794	0,616	-0,614	0,850	0,898	-0,832	0,819	1,000	0,829	0,911	0,941	0,985	0,925	-0,911	0,817
Ca	0,864	-0,666	0,225	-0,843	0,411	0,575	-0,999	0,767	0,829	1,000	0,925	0,596	0,833	0,570	-0,594	0,384
Mg	0,883	-0,559	0,572	-0,884	0,626	0,638	-0,938	0,948	0,911	0,925	1,000	0,781	0,954	0,775	-0,662	0,650
pH	0,411	-0,690	0,800	-0,425	0,975	0,918	-0,604	0,766	0,941	0,596	0,781	1,000	0,931	0,998	-0,928	0,962
H	0,704	-0,679	0,694	-0,710	0,828	0,822	-0,843	0,905	0,985	0,833	0,954	0,931	1,000	0,925	-0,840	0,829
Ø	0,410	-0,645	0,835	-0,428	0,977	0,895	-0,579	0,779	0,925	0,570	0,775	0,998	0,925	1,000	-0,905	0,975
▲	-0,240	0,897	-0,537	0,235	-0,916	-1,000	0,584	-0,540	-0,911	-0,594	-0,662	-0,928	-0,840	-0,905	1,000	-0,830
MS	0,278	-0,500	0,913	-0,306	0,981	0,821	-0,398	0,715	0,817	0,384	0,650	0,962	0,829	0,975	-0,830	1,000

NOTA : <sup>(a)</sup> Acúmulo de metais pesados na raiz (mg/kg da massa seca) <sup>(b)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(c)</sup> Ø - diâmetro de colo (mm) <sup>(d)</sup> ▲ - Teor de óleo (%) <sup>(e)</sup> MS - Peso da massa seca da raiz (g).

ANEXO 14 - QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE OS ACÚMULOS DE METAIS NO CAULE DE AROEIRA, PH DO SOLO, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO DE AROEIRA, FRAÇÃO OLEOSA DO SOLO (%), PESO SECO DO CAULE DE AROEIRA

	Na <sup>(a)</sup>	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	K	Cr	Ca	Mg	pH	H <sup>(b)</sup>	Ø <sup>(c)</sup>	▲ <sup>(d)</sup>	MS <sup>(e)</sup>
Na	1,000	-0,922	-0,984	0,593	-0,921	0,403	-0,444	-0,927	0,225	-0,886	-0,771	-0,856	-0,963	-0,862	0,674	-0,926
Ni	-0,922	1,000	0,944	-0,376	0,843	-0,329	0,485	0,890	0,058	0,724	0,581	0,923	0,892	0,942	-0,713	0,941
V	-0,984	0,944	1,000	-0,441	0,847	-0,252	0,586	0,867	-0,052	0,791	0,647	0,818	0,909	0,835	-0,582	0,888
Zn	0,593	-0,376	-0,441	1,000	-0,816	0,901	0,413	-0,755	0,902	-0,898	-0,970	-0,616	-0,747	-0,571	0,770	-0,654
Al	-0,921	0,843	0,847	-0,816	1,000	-0,727	0,066	0,994	-0,488	0,974	0,926	0,932	0,991	0,918	-0,889	0,967
Cu	0,403	-0,329	-0,252	0,901	-0,727	1,000	0,636	-0,695	0,797	-0,744	-0,840	-0,657	-0,631	-0,611	0,882	-0,623
Fe	-0,444	0,485	0,586	0,413	0,066	0,636	1,000	0,111	0,642	0,001	-0,196	0,112	0,196	0,164	0,267	0,191
K	-0,927	0,890	0,867	-0,755	0,994	-0,695	0,111	1,000	-0,399	0,944	0,881	0,965	0,991	0,956	-0,901	0,989
Cr	0,225	0,058	-0,052	0,058	-0,488	0,797	0,642	-0,399	1,000	-0,638	-0,778	-0,224	-0,395	-0,167	0,478	-0,264
Ca	-0,886	0,724	0,791	-0,898	0,974	-0,744	0,001	0,944	-0,638	1,000	0,978	0,828	0,957	0,806	-0,819	0,886
Mg	-0,771	0,581	0,647	-0,970	0,926	-0,840	-0,196	0,881	-0,778	0,978	1,000	0,753	0,884	0,719	-0,820	0,802
pH	-0,856	0,923	0,818	-0,616	0,932	-0,657	0,112	0,965	-0,224	0,828	0,753	1,000	0,931	0,998	-0,928	0,987
H	-0,963	0,892	0,909	-0,747	0,991	-0,631	0,196	0,991	-0,395	0,957	0,884	0,931	1,000	0,925	-0,840	0,976
Ø	-0,862	0,942	0,835	-0,571	0,918	-0,611	0,164	0,956	-0,167	0,806	0,719	0,998	0,925	1,000	-0,905	0,986
▲	0,674	-0,713	-0,582	0,770	-0,889	0,882	0,267	-0,901	0,478	-0,819	-0,820	-0,928	-0,840	-0,905	1,000	-0,889
MS	-0,926	0,941	0,888	-0,654	0,967	-0,623	0,191	0,989	-0,264	0,886	0,802	0,987	0,976	0,986	-0,889	1,000

NOTA : <sup>(a)</sup> Acúmulo de metais pesados no caule (mg/kg da massa seca) <sup>(b)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(c)</sup> Ø - diâmetro de colo (mm) <sup>(d)</sup> ▲ - Teor de óleo (%) <sup>(e)</sup> MS - Peso da massa seca do caule (g).

ANEXO 15 - QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE METAIS NAS FOLHAS DE AROERIA, PH DO SOLO, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO DE AROEIRA, FRAÇÃO OLEOSA DO SOLO (%), PESO SECO DAS FOLHAS DE AROEIRA

	Na <sup>(a)</sup>	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	K	Cr	Ca	Mg	pH	H <sup>(b)</sup>	Ø <sup>(c)</sup>	▲ <sup>(d)</sup>	MS <sup>(e)</sup>
Na	1,000	0,894	-0,089	0,364	-0,288	-0,664	-0,182	-0,337	-0,592	-0,636	0,452	-0,598	-0,660	-0,549	0,811	-0,549
Ni	0,894	1,000	-0,468	0,643	0,109	-0,377	0,275	-0,626	-0,309	-0,742	0,053	-0,182	-0,326	-0,124	0,465	-0,167
V	-0,089	-0,468	1,000	-0,944	-0,436	-0,640	-0,890	0,953	-0,687	0,061	0,848	-0,705	-0,681	-0,744	0,390	-0,783
Zn	0,364	0,643	-0,944	1,000	0,173	0,445	0,701	-1,000	0,518	-0,101	-0,648	0,435	0,459	0,485	-0,068	0,565
Al	-0,288	0,109	-0,436	0,173	1,000	0,301	0,786	-0,195	0,254	-0,465	-0,559	0,735	0,438	0,740	-0,746	0,541
Cu	-0,664	-0,377	-0,640	0,445	0,301	1,000	0,664	-0,469	0,995	0,618	-0,922	0,867	0,989	0,858	-0,773	0,953
Fe	-0,182	0,275	-0,890	0,701	0,786	0,664	1,000	-0,721	0,668	-0,175	-0,900	0,895	0,753	0,919	-0,702	0,858
K	-0,337	-0,626	0,953	-1,000	-0,195	-0,469	-0,721	1,000	-0,540	0,092	0,671	-0,463	-0,485	-0,512	0,099	-0,590
Cr	-0,592	-0,309	-0,687	0,518	0,254	0,995	0,668	-0,540	1,000	0,614	-0,925	0,842	0,978	0,838	-0,716	0,948
Ca	-0,636	-0,742	0,061	-0,101	-0,465	0,618	-0,175	0,092	0,614	1,000	-0,270	0,185	0,505	0,150	-0,241	0,350
Mg	0,452	0,053	0,848	-0,648	-0,559	-0,922	-0,900	0,671	-0,925	-0,270	1,000	-0,954	-0,959	-0,963	0,788	-0,993
pH	-0,598	-0,182	-0,705	0,435	0,735	0,867	0,895	-0,463	0,842	0,185	-0,954	1,000	0,931	0,998	-0,928	0,964
H	-0,660	-0,326	-0,681	0,459	0,438	0,989	0,753	-0,485	0,978	0,505	-0,959	0,931	1,000	0,925	-0,840	0,984
Ø	-0,549	-0,124	-0,744	0,485	0,740	0,858	0,919	-0,512	0,838	0,150	-0,963	0,998	0,925	1,000	-0,905	0,966
▲	0,811	0,465	0,390	-0,068	-0,746	-0,773	-0,702	0,099	-0,716	-0,241	0,788	-0,928	-0,840	-0,905	1,000	-0,832
MS	-0,549	-0,167	-0,783	0,565	0,541	0,953	0,858	-0,590	0,948	0,350	-0,993	0,964	0,984	0,966	-0,832	1,000

NOTA : <sup>(a)</sup> Concentração de metais pesados nas folhas (mg/kg da massa seca) <sup>(b)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(c)</sup> Ø- Diâmetro de colo (mm) <sup>(d)</sup> ▲- Teor de óleo (%) <sup>(e)</sup> MS- Peso da massa seca das folhas (g).

ANEXO 16 - QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE OS ACÚMULOS DE METAIS NAS RAÍZES DE CASUARINA, PH DO SOLO, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO DE CASUARINA, FRAÇÃO OLEOSA DO SOLO (%), PESO SECO DAS RAÍZES DE CASUARINA

	Na <sup>(a)</sup>	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	Pb	K	Cr	Ca	Mg	pH	H <sup>(b)</sup>	Ø <sup>(c)</sup>	▲ <sup>(d)</sup>	MS <sup>(e)</sup>
Na	1,000	-0,604	-0,570	-0,408	-0,376	0,064	-0,153	-0,751	0,380	-0,907	0,088	-0,283	0,069	-0,059	0,394	-0,245	0,205
Ni	-0,604	1,000	0,935	0,901	0,276	-0,827	0,543	0,913	-0,639	0,597	-0,614	-0,335	-0,622	-0,507	-0,738	0,620	-0,771
V	-0,570	0,935	1,000	0,983	0,586	-0,815	0,793	0,742	-0,870	0,710	-0,821	-0,564	-0,820	-0,729	-0,927	0,850	-0,912
Zn	-0,408	0,901	0,983	1,000	0,571	-0,890	0,849	0,653	-0,883	0,587	-0,895	-0,692	-0,898	-0,826	-0,944	0,892	-0,968
Al	-0,376	0,276	0,586	0,571	1,000	-0,202	0,842	0,020	-0,885	0,730	-0,727	-0,597	-0,701	-0,694	-0,807	0,838	-0,631
Cu	0,064	-0,827	-0,815	-0,890	-0,202	1,000	-0,672	-0,578	0,631	-0,172	0,792	0,702	0,812	0,763	0,731	-0,700	0,887
Fe	-0,153	0,543	0,793	0,849	0,842	-0,672	1,000	0,181	-0,972	0,512	-0,982	-0,898	-0,975	-0,967	-0,959	0,995	-0,933
Pb	-0,751	0,913	0,742	0,653	0,020	-0,578	0,181	1,000	-0,335	0,583	-0,246	0,077	-0,253	-0,114	-0,442	0,279	-0,448
K	0,380	-0,639	-0,870	-0,883	-0,885	0,631	-0,972	-0,335	1,000	-0,697	0,937	0,772	0,925	0,889	0,989	-0,988	0,915
Cr	-0,907	0,597	0,710	0,587	0,730	-0,172	0,512	0,583	-0,697	1,000	-0,416	-0,082	-0,391	-0,293	-0,676	0,578	-0,463
Ca	0,088	-0,614	-0,821	-0,895	-0,727	0,792	-0,982	-0,246	0,937	-0,416	1,000	0,929	0,999	0,989	0,950	-0,979	0,975
Mg	-0,283	-0,335	-0,564	-0,692	-0,597	0,702	-0,898	0,077	0,772	-0,082	0,929	1,000	0,933	0,974	0,770	-0,859	0,850
pH	0,069	-0,622	-0,820	-0,898	-0,701	0,812	-0,975	-0,253	0,925	-0,391	0,999	0,933	1,000	0,990	0,942	-0,972	0,978
H	-0,059	-0,507	-0,729	-0,826	-0,694	0,763	-0,967	-0,114	0,889	-0,293	0,989	0,974	0,990	1,000	0,894	-0,949	0,939
Ø	0,394	-0,738	-0,927	-0,944	-0,807	0,731	-0,959	-0,442	0,989	-0,676	0,950	0,770	0,942	0,894	1,000	-0,984	0,957
▲	-0,245	0,620	0,850	0,892	0,838	-0,700	0,995	0,279	-0,988	0,578	-0,979	-0,859	-0,972	-0,949	-0,984	1,000	-0,950
MS	0,205	-0,771	-0,912	-0,968	-0,631	0,887	-0,933	-0,448	0,915	-0,463	0,975	0,850	0,978	0,939	0,957	-0,950	1,000

NOTA : <sup>(a)</sup> Acúmulo de metais pesados na raiz (mg/kg da massa seca) <sup>(b)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(c)</sup> Ø - Diâmetro de colo (mm) <sup>(d)</sup> ▲ - Teor de óleo (%) <sup>(e)</sup> MS - Peso da massa seca da raiz (g).

ANEXO 17 - QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE OS ACÚMULOS DE METAIS NO CAULE DE CASUARINA, PH DO SOLO, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO DE CASUARINA, FRAÇÃO OLEOSA DO SOLO (%), PESO SECO DO CAULE DE CASUARINA

	Na <sup>(a)</sup>	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	K	Cr	Ca	Mg	pH	H <sup>(b)</sup>	Ø <sup>(c)</sup>	▲ <sup>(d)</sup>	MS <sup>(e)</sup>
Na	1,000	-0,905	-0,630	-0,361	-0,008	-0,583	0,150	-0,773	-0,626	-0,569	-0,204	-0,450	-0,542	-0,372	0,512	-0,421
Ni	-0,905	1,000	0,871	0,724	0,403	0,447	0,196	0,443	0,883	0,222	0,577	0,028	0,138	-0,041	-0,104	0,001
V	-0,630	0,871	1,000	0,887	0,780	-0,022	0,652	0,129	0,843	0,017	0,673	-0,365	-0,291	-0,305	0,220	-0,311
Zn	-0,361	0,724	0,887	1,000	0,872	0,032	0,675	-0,281	0,919	-0,436	0,933	-0,668	-0,575	-0,693	0,601	-0,679
Al	-0,008	0,403	0,780	0,872	1,000	-0,460	0,947	-0,480	0,611	-0,474	0,740	-0,848	-0,821	-0,726	0,722	-0,768
Cu	-0,583	0,447	-0,022	0,032	-0,460	1,000	-0,716	0,404	0,411	0,109	0,204	0,480	0,593	0,172	-0,329	0,286
Fe	0,150	0,196	0,652	0,675	0,947	-0,716	1,000	-0,462	0,342	-0,351	0,489	-0,800	-0,819	-0,585	0,636	-0,660
K	-0,773	0,443	0,129	-0,281	-0,480	0,404	-0,462	1,000	-0,011	0,945	-0,463	0,871	0,884	0,876	-0,936	0,895
Cr	-0,626	0,883	0,843	0,919	0,611	0,411	0,342	-0,011	1,000	-0,262	0,891	-0,365	-0,239	-0,491	0,345	-0,438
Ca	-0,569	0,222	0,017	-0,436	-0,474	0,109	-0,351	0,945	-0,262	1,000	-0,667	0,843	0,810	0,945	-0,946	0,928
Mg	-0,204	0,577	0,673	0,933	0,740	0,204	0,489	-0,463	0,891	-0,667	1,000	-0,709	-0,601	-0,832	0,727	-0,791
pH	-0,450	0,028	-0,365	-0,668	-0,848	0,480	-0,800	0,871	-0,365	0,843	-0,709	1,000	0,990	0,942	-0,972	0,974
H	-0,542	0,138	-0,291	-0,575	-0,821	0,593	-0,819	0,884	-0,239	0,810	-0,601	0,990	1,000	0,894	-0,949	0,940
Ø	-0,372	-0,041	-0,305	-0,693	-0,726	0,172	-0,585	0,876	-0,491	0,945	-0,832	0,942	0,894	1,000	-0,984	0,993
▲	0,512	-0,104	0,220	0,601	0,722	-0,329	0,636	-0,936	0,345	-0,946	0,727	-0,972	-0,949	-0,984	1,000	-0,995
MS	-0,421	0,001	-0,311	-0,679	-0,768	0,286	-0,660	0,895	-0,438	0,928	-0,791	0,974	0,940	0,993	-0,995	1,000

NOTA : <sup>(a)</sup> Acúmulo de metais pesados no caule (mg/kg da massa seca) <sup>(b)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(c)</sup> Ø - Diâmetro de colo (mm) <sup>(d)</sup> ▲ - Teor de óleo (%) <sup>(e)</sup> MS - Peso da massa seca do caule (g).

ANEXO 18 - QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE METAIS NAS FOLHAS DE CASUARINA, PH DO SOLO, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO DE CASUARINA, FRAÇÃO OLEOSA DO SOLO (%), PESO SECO DAS FOLHAS DE CASUARINA

	Na <sup>(a)</sup>	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	Pb	K	Cr	Ca	Mg	pH	H <sup>(b)</sup>	Ø <sup>(c)</sup>	▲ <sup>(d)</sup>	MS <sup>(e)</sup>
Na	1,000	0,355	0,920	0,929	0,905	0,196	0,821	0,112	0,268	-0,959	0,180	0,909	-0,932	-0,871	-0,979	0,943	-0,965
Ni	0,355	1,000	-0,030	0,558	0,081	-0,684	-0,148	-0,478	-0,803	-0,090	-0,350	0,106	-0,025	0,111	-0,205	0,033	-0,109
V	0,920	-0,030	1,000	0,788	0,964	0,543	0,966	0,232	0,604	-0,974	0,420	0,958	-0,997	-0,991	-0,945	0,982	-0,975
Zn	0,929	0,558	0,788	1,000	0,872	0,140	0,738	-0,262	-0,007	-0,799	0,303	0,884	-0,829	-0,754	-0,835	0,774	-0,814
Al	0,905	0,081	0,964	0,872	1,000	0,574	0,974	-0,035	0,464	-0,905	0,573	1,000	-0,981	-0,972	-0,881	0,909	-0,913
Cu	0,196	-0,684	0,543	0,140	0,574	1,000	0,721	0,008	0,786	-0,352	0,882	0,558	-0,533	-0,645	-0,241	0,399	-0,349
Fe	0,821	-0,148	0,966	0,738	0,974	0,721	1,000	0,084	0,647	-0,882	0,641	0,967	-0,969	-0,991	-0,832	0,899	-0,885
Pb	0,112	-0,478	0,232	-0,262	-0,035	0,008	0,084	1,000	0,623	-0,333	-0,460	-0,057	-0,156	-0,180	-0,304	0,351	-0,308
K	0,268	-0,803	0,604	-0,007	0,464	0,786	0,647	0,623	1,000	-0,521	0,408	0,440	-0,552	-0,650	-0,418	0,568	-0,504
Cr	-0,959	-0,090	-0,974	-0,799	-0,905	-0,352	-0,882	-0,333	-0,521	1,000	-0,207	-0,901	0,967	0,936	0,992	-0,998	1,000
Ca	0,180	-0,350	0,420	0,303	0,573	0,882	0,641	-0,460	0,408	-0,207	1,000	0,570	-0,449	-0,531	-0,126	0,240	-0,217
Mg	0,909	0,106	0,958	0,884	1,000	0,558	0,967	-0,057	0,440	-0,901	0,570	1,000	-0,977	-0,965	-0,879	0,903	-0,909
pH	-0,932	-0,025	-0,997	-0,829	-0,981	-0,533	-0,969	-0,156	-0,552	0,967	-0,449	-0,977	1,000	0,990	0,942	-0,972	0,970
H	-0,871	0,111	-0,991	-0,754	-0,972	-0,645	-0,991	-0,180	-0,650	0,936	-0,531	-0,965	0,990	1,000	0,894	-0,949	0,937
Ø	-0,979	-0,205	-0,945	-0,835	-0,881	-0,241	-0,832	-0,304	-0,418	0,992	-0,126	-0,879	0,942	0,894	1,000	-0,984	0,994
▲	0,943	0,033	0,982	0,774	0,909	0,399	0,899	0,351	0,568	-0,998	0,240	0,903	-0,972	-0,949	-0,984	1,000	-0,997
MS	-0,965	-0,109	-0,975	-0,814	-0,913	-0,349	-0,885	-0,308	-0,504	1,000	-0,217	-0,909	0,970	0,937	0,994	-0,997	1,000

NOTA : <sup>(a)</sup> Concentração de metais pesados nas folhas (mg/kg da massa seca) <sup>(b)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(c)</sup> Ø - Diâmetro de colo (mm) <sup>(d)</sup> ▲ - Teor de óleo (%) <sup>(e)</sup> MS - Peso da massa seca das folhas (g).

ANEXO 19 -QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO, PESO DA MASSA SECA TOTAL, QUANTIDADE DE FUNGOS, BACTÉRIAS E ATIVIDADE RESPIRATÓRIA DO SOLO AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO NA ÁREA 4T (TESTEMUNHA)

	H <sup>(a)</sup>	Ø <sup>(b)</sup>	MS total <sup>(c)</sup>	fungo 399 <sup>(d)</sup>	fungo 525	fungo 600	bact 399	bact 525	bact 600	CO <sub>2</sub> 399 <sup>(e)</sup>	CO <sub>2</sub> 525	CO <sub>2</sub> 600
H	1,00	-0,17	<b>0,65<sup>(f)</sup></b>	-0,42	<b>-0,75</b>	0,26	-0,33	0,05	-0,16	0,11	-0,41	-0,21
Ø	-0,17	1,00	0,26	0,59	0,17	0,12	0,39	0,07	-0,37	-0,37	0,16	-0,28
MS total	<b>0,65</b>	0,26	1,00	-0,13	-0,52	0,50	-0,52	0,54	-0,46	-0,16	0,05	-0,21
fungo 399	-0,42	0,59	-0,13	1,00	0,41	-0,29	0,38	-0,17	-0,09	-0,27	0,58	-0,05
fungo 525	<b>-0,75</b>	0,17	-0,52	0,41	1,00	-0,20	0,59	-0,17	0,44	0,06	-0,02	0,12
fungo 600	0,26	0,12	0,50	-0,29	-0,20	1,00	-0,24	-0,07	-0,21	0,60	-0,38	0,37
bact 399	-0,33	0,39	-0,52	0,38	0,59	-0,24	1,00	-0,48	0,58	0,02	-0,29	0,18
bact 525	0,05	0,07	0,54	-0,17	-0,17	-0,07	-0,48	1,00	-0,15	-0,48	0,37	-0,15
bact 600	-0,16	-0,37	-0,46	-0,09	0,44	-0,21	0,58	-0,15	1,00	0,34	-0,33	0,61
CO <sub>2</sub> 399	0,11	-0,37	-0,16	-0,27	0,06	0,60	0,02	-0,48	0,34	1,00	-0,54	0,60
CO <sub>2</sub> 525	-0,41	0,16	0,05	0,58	-0,02	-0,38	-0,29	0,37	-0,33	-0,54	1,00	-0,04
CO <sub>2</sub> 600	-0,21	-0,28	-0,21	-0,05	0,12	0,37	0,18	-0,15	0,61	0,60	-0,04	1,00

NOTA: <sup>(a)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(b)</sup> Ø - Diâmetro de colo (mm) <sup>(c)</sup> MS total - Peso da massa seca total de ipê, aroeira, casuarina (g) <sup>(d)</sup> Contagem das colônias de fungos e bactérias aos 399, 525 e 600 dias após o plantio <sup>(e)</sup> Atividade respiratória do solo da área 4T <sup>(f)</sup> Correlações em negrito e itálico são significativas (P<0,05).



ANEXO 20 -QUADRO DE CORRELAÇÕES (r) ENTRE ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO, PESO DA MASSA SECA TOTAL, QUANTIDADE DE FUNGOS, BACTÉRIAS E ATIVIDADE RESPIRATÓRIA DO SOLO AOS 399, 525 E 600 DIAS APÓS O PLANTIO NA ÁREA 4

	pH	H <sup>(a)</sup>	Ø <sup>(b)</sup>	▲ <sup>(c)</sup>	MS total <sup>(d)</sup>	fungo 399 <sup>(e)</sup>	fungo 525	fungo 600	bact 399	bact 525	bact 600	CO <sub>2</sub> 399 <sup>(f)</sup>	CO <sub>2</sub> 525	CO <sub>2</sub> 600
pH	1,00	0,56	<b>0,85<sup>(g)</sup></b>	<b>-0,80</b>	<b>0,72</b>	-0,33	-0,07	0,33	0,25	-0,53	-0,23	-0,16	-0,12	-0,08
H	0,56	1,00	0,39	-0,56	<b>0,79</b>	-0,14	-0,12	0,43	0,18	-0,50	-0,13	0,12	-0,28	-0,32
Ø	<b>0,85</b>	0,39	1,00	<b>-0,63</b>	<b>0,75</b>	-0,20	0,00	0,06	0,22	-0,25	-0,27	0,01	-0,02	0,08
▲	<b>-0,80</b>	-0,56	<b>-0,63</b>	1,00	<b>-0,74</b>	0,20	-0,05	-0,22	-0,03	0,39	-0,03	0,36	0,37	0,43
MS total	<b>0,72</b>	<b>0,79</b>	<b>0,75</b>	<b>-0,74</b>	1,00	-0,25	-0,14	0,07	0,01	-0,30	-0,28	-0,08	-0,22	-0,22
fungo 399	-0,33	-0,14	-0,20	0,20	-0,25	1,00	-0,04	0,26	<b>0,58</b>	0,02	-0,20	0,25	-0,04	-0,05
fungo 525	-0,07	-0,12	0,00	-0,05	-0,14	-0,04	1,00	-0,23	-0,10	0,00	0,42	-0,04	-0,31	-0,17
fungo 600	0,33	0,43	0,06	-0,22	0,07	0,26	-0,23	1,00	<b>0,65</b>	-0,50	-0,04	-0,11	-0,43	-0,21
bact 399	0,25	0,18	0,22	-0,03	0,01	<b>0,58</b>	-0,10	<b>0,65</b>	1,00	<b>-0,67</b>	-0,22	0,05	-0,19	-0,23
bact 525	-0,53	-0,50	-0,25	0,39	-0,30	0,02	0,00	-0,50	<b>-0,67</b>	1,00	0,13	0,27	0,36	<b>0,62</b>
bact 600	-0,23	-0,13	-0,27	-0,03	-0,28	-0,20	0,42	-0,04	-0,22	0,13	1,00	0,04	-0,07	-0,25
CO <sub>2</sub> 399	-0,16	0,12	0,01	0,36	-0,08	0,25	-0,04	-0,11	0,05	0,27	0,04	1,00	<b>0,70</b>	0,54
CO <sub>2</sub> 525	-0,12	-0,28	-0,02	0,37	-0,22	-0,04	-0,31	-0,43	-0,19	0,36	-0,07	<b>0,70</b>	1,00	<b>0,70</b>
CO <sub>2</sub> 600	-0,08	-0,32	0,08	0,43	-0,22	-0,05	-0,17	-0,21	-0,23	<b>0,62</b>	-0,25	0,54	<b>0,70</b>	1,00

NOTA : <sup>(a)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(b)</sup> Ø - Diâmetro de colo (mm) <sup>(c)</sup> ▲ - Quantidade da fração oleosa <sup>(d)</sup> ms total - Peso da massa seca total de ipê, aroeira, casuarina (g) <sup>(e)</sup> Contagem das colônias de fungos e bactérias aos 399, 525 e 600 dias após o plantio <sup>(f)</sup> Atividade respiratória do solo da área 4 <sup>(g)</sup> Correlações em negrito e itálico são significativas (p<0,05).

ANEXO 21 - QUADRO GERAL DE CORRELAÇÕES ENTRE PH DO SOLO DA ÁREA 4, ALTURA DAS PLANTAS, DIÂMETRO DE COLO, PESO DA MASSA SECA TOTAL DAS PLANTAS, ACÚMULOS DE METAIS NA MASSA SECA TOTAL DAS PLANTAS, QUANTIDADE DE FUNGOS, BACTÉRIAS E CO<sub>2</sub> ELIMINADO PELOS MICRORGANISMOS DO SOLO DA ÁREA 4

	pH	H <sup>(a)</sup>	Ø <sup>(b)</sup>	▲ <sup>(c)</sup>	MS tot <sup>(d)</sup>	Na	Ni	V	Zn	Al	Cu	Fe	K	Cr	Ca	Mg	fungo <sup>(e)</sup>	bact	CO <sub>2</sub> <sup>(f)</sup>
pH	1,00	<b>0,55<sup>(g)</sup></b>	<b>0,88</b>	<b>-0,79</b>	<b>0,61</b>	-0,20	-0,05	-0,30	-0,24	-0,04	0,19	-0,04	0,06	-0,20	0,08	-0,09	-0,04	-0,32	-0,14
H	<b>0,55</b>	1,00	<b>0,39</b>	<b>-0,56</b>	<b>0,64</b>	-0,14	0,18	-0,05	0,02	0,02	0,32	-0,10	-0,31	0,06	-0,01	-0,04	0,11	<b>-0,33</b>	-0,20
Ø	<b>0,88</b>	<b>0,39</b>	1,00	<b>-0,63</b>	<b>0,62</b>	-0,12	-0,30	-0,31	<b>-0,48</b>	-0,24	0,08	-0,13	0,21	-0,28	0,12	-0,09	-0,09	-0,33	0,02
▲	<b>-0,79</b>	<b>-0,56</b>	<b>-0,63</b>	1,00	<b>-0,60</b>	0,25	-0,11	<b>0,37</b>	0,14	-0,03	-0,32	0,06	0,05	0,22	-0,14	0,00	-0,03	0,15	<b>0,44</b>
MS tot	<b>0,61</b>	<b>0,64</b>	<b>0,62</b>	<b>-0,60</b>	1,00	<b>-0,53</b>	-0,04	-0,18	-0,15	-0,02	0,26	0,02	-0,27	-0,05	-0,25	-0,32	-0,15	-0,31	-0,16
Na	-0,20	-0,14	-0,12	0,25	<b>-0,53</b>	1,00	-0,14	0,10	-0,18	<b>-0,34</b>	<b>-0,40</b>	<b>-0,38</b>	<b>0,48</b>	-0,22	<b>0,63</b>	<b>0,74</b>	0,22	0,20	0,18
Ni	-0,05	0,18	-0,30	-0,11	-0,04	-0,14	1,00	0,29	<b>0,77</b>	<b>0,55</b>	0,24	<b>0,55</b>	<b>-0,46</b>	0,25	-0,21	-0,15	0,17	0,06	-0,26
V	-0,30	-0,05	-0,31	<b>0,37</b>	-0,18	0,10	0,29	1,00	<b>0,53</b>	<b>0,41</b>	0,11	<b>0,37</b>	0,02	<b>0,33</b>	0,07	0,07	-0,18	-0,18	-0,11
ZN	-0,24	0,02	<b>-0,48</b>	0,14	-0,15	-0,18	<b>0,77</b>	<b>0,53</b>	1,00	<b>0,78</b>	0,30	<b>0,68</b>	<b>-0,51</b>	<b>0,43</b>	-0,24	-0,27	0,05	0,09	-0,17
Al	-0,04	0,02	-0,24	-0,03	-0,02	<b>-0,34</b>	<b>0,55</b>	<b>0,41</b>	<b>0,78</b>	1,00	<b>0,47</b>	<b>0,73</b>	<b>-0,46</b>	<b>0,40</b>	-0,28	<b>-0,39</b>	-0,03	0,16	-0,17
Cu	0,19	0,32	0,08	-0,32	0,26	<b>-0,40</b>	0,24	0,11	0,30	<b>0,47</b>	1,00	<b>0,55</b>	<b>-0,34</b>	0,23	<b>-0,34</b>	-0,33	-0,07	0,04	-0,10
Fe	-0,04	-0,10	-0,13	0,06	0,02	<b>-0,38</b>	<b>0,55</b>	<b>0,37</b>	<b>0,68</b>	<b>0,73</b>	<b>0,55</b>	1,00	-0,33	0,12	<b>-0,45</b>	<b>-0,42</b>	-0,06	0,03	0,06
K	0,06	-0,31	0,21	0,05	-0,27	<b>0,48</b>	<b>-0,46</b>	0,02	<b>-0,51</b>	<b>-0,46</b>	<b>-0,34</b>	-0,33	1,00	-0,31	<b>0,66</b>	<b>0,67</b>	-0,17	-0,14	0,14
Cr	-0,20	0,06	-0,28	0,22	-0,05	-0,22	0,25	<b>0,33</b>	<b>0,43</b>	<b>0,40</b>	0,23	0,12	-0,31	1,00	-0,19	-0,26	-0,05	0,07	-0,01
Ca	0,08	-0,01	0,12	-0,14	-0,25	<b>0,63</b>	-0,21	0,07	-0,24	-0,28	<b>-0,34</b>	<b>-0,45</b>	<b>0,66</b>	-0,19	1,00	<b>0,85</b>	-0,11	-0,15	-0,05
Mg	-0,09	-0,04	-0,09	0,00	-0,32	<b>0,74</b>	-0,15	0,07	-0,27	<b>-0,39</b>	-0,33	<b>-0,42</b>	<b>0,67</b>	-0,26	<b>0,85</b>	1,00	0,00	-0,02	0,00
Fungo	-0,04	0,11	-0,09	-0,03	-0,15	0,22	0,17	-0,18	0,05	-0,03	-0,07	-0,06	-0,17	-0,05	-0,11	0,00	1,00	-0,02	-0,25
Bact	-0,32	<b>-0,33</b>	-0,33	0,15	-0,31	0,20	0,06	-0,18	0,09	0,16	0,04	0,03	-0,14	0,07	-0,15	-0,02	-0,02	1,00	0,11
CO <sub>2</sub>	<b>-0,14</b>	-0,20	0,02	<b>0,44</b>	-0,16	0,18	-0,26	-0,11	-0,17	-0,17	-0,10	0,06	0,14	-0,01	-0,05	0,00	-0,25	0,11	1,00

NOTA : <sup>(a)</sup> H - Altura das plantas (cm) <sup>(b)</sup> Ø - Diâmetro de colo (mm) <sup>(c)</sup> ▲ - Quantidade da fração oleosa <sup>(d)</sup> MS tot - peso da massa seca total de ipê, aroeira, casuarina (g) <sup>(e)</sup> Contagem geral das colônias de fungos e bactérias <sup>(f)</sup> Atividade respiratória do solo da área 4 <sup>(g)</sup> Correlações em negrito e itálico são significativas (p<0,05).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos**, NBR 10004. Rio de Janeiro, 1987.
- ALEXANDER, M. **Introducción a la microbiología del suelo**. 2. ed. Planta Alta : libros y editoriales, 1980.
- ALI, E. A. Damage to plants due to industrial pollution and their use as bioindicators in Egypt. **Environmental Pollution**, London, v. 81, n. 3, p. 251-255, 1993. Resumo.
- AMADI, A.; ABBEY, S. D.; NMA, A. Chronic effects of oil spill on soil properties and microflora of a rainforest ecosystem in Nigeria. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 86, n. 1-4, p. 1-11, 1996. **Pollution-and-Degradation; Forestry-General** (CD). Resumo.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. Molybdenum as an essential element for green plants, **Nature**, London, v. 172, p. 599-602, 1939.
- ASCHMANN, S. G.; McINTOSH, M. S.; ANGLE, J. S; HILL, R. L. et al. Nitrogen status of forest floor, soils and vegetation following municipal wastewater sludge application, **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 19, n. 4, p. 687-694, 1990. **CAB : OF Forestry-Abstracts** (CD), 1992, Ref. 053-03903. Resumo.
- ATLAS, R. M.; BARTHA, R. **Microbial Ecology, Fundamentals and applications**. Addison-Wesley : Reading, Mass, 1981.
- AUER, C. G.; SILVA, R. Fixação de nitrogênio em espécies arbóreas. In: CARDOSO, E. J. B. N. **Microbiologia do solo**. Piracicaba : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992.
- BAKER A. J. M.; BROOKS, R. R.; PEASE, A. J.; MALAISSE, F. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaïre. **Plant and Soil**, The Hague, v. 73, p. 377-385, 1983.
- BARBIER, D.; PERRINE, D.; DUHAMEL, C. et al. Parasitic hazard with sewage sludge applied to land. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 56, p. 1420-1422, 1990.
- BARTHA, R.; BOSSERT, I. Treatment and disposal of petroleum refinery wastes. In: ATLAS, R. M. **Petroleum Microbiology**, New York : Macmillan, 1984. p. 553-557.
- BARTHA, R. Land Treatment: Biodegradative. **UNESCO-PNDU-CETESB**, São Paulo, nov. 1986.
- BAUD GRASSET, F; BAUD GRASSET, S; SAFFEMAN, S. I. Evaluations of the bioremediation of a contaminated soil with phytotoxicity tests. **Chemosphere**, Ohio, v. 26, n. 7, p. 1365-1374, 1993. **CAB INTERNATIONAL** (CD). Resumo.

- BENNETT, F. A.; TYLER, E. K.; BROOKS, R. R.; GREGG, P. E. H.; STEWART, R. B.; BROOKS, R. R. Fertilisation of hyperaccumulators to enhance their potential for phytoremediation and phytomining. In: **Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining**. Palmerston North, 1998. p. 249-259. **CAB INTERNATIONAL** (CD), Wallingford. Resumo.
- BERRY, C. R. Growth response fo four hardwood tree species to spot fertilization by nutrient tablets in the Tennessee Copper Basin. **Reclamation and Revegetation Research**, Athens, v. 2, n. 3, p. 167-175, 1983. **CAB : OF Forestry-Abstracts** (CD), 1985. Ref. 046-00095. Resumo.
- BERTI, B. **Remediation technology development**. Palestra apresentada no Workshop phytoremediation of organics contaminants, 1996. Valor do Fort, Dec. 1996. Site internet [www.rtdf.org/phyttomin.htm](http://www.rtdf.org/phyttomin.htm)
- BEWLEY, R. J. F. Bioremediation of contaminated ground. In: RESS, J. F. **Contaminated land treatment tecnologies**. Barking : Elsevier Science Publishers, 1992. p. 270-284.
- BOLLAG, J.; MERTZ, T.; OTJEN, L. Role of microorganisms in soil bioremediation. **American Chemical Society**, Washington, v. 97, p. 2-10, 1994.
- BOSSERT, I.; BARTHA, R. Plant growth in soils with a history of oily sludge disposal. **Soil Science**, Baltimore, v. 140, p. 75-77, 1985.
- \_\_\_\_\_. The fate of petroleum in soil ecosystems. In: ATLAS, R. M. **Petroleum Microbiology**. New York : Macmillan, 1984. p. 435-473.
- BOSSERT, I.; KACHEL, W. M.; BARTHA, R. Fate of hydrocarbons during oily sludge disposal in soil. **Applied and Environmental Microbiology**. v. 47, n. 4, p. 763-767, 1984. **CAB: OS Soils-and-Fertilizers** (CD), 1986. Ref. 049-00846. Resumo.
- BRANCO, S. M. **Hidrologia aplicada a engenharia sanitária**. São Paulo : Convênio CETESB ASCETESB, 1986.
- BREITUNG, J.; NAGEL, D. B.; STEINBACH, K. et al. Bioremediation of 2,4,6 trinitrotoluene contaminated soils by two different aerated compost systems. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 44, n. 6, p. 795-800, 1996. **CAB: Biodeterioration-Abstracts** (CD). Resumo.
- BROOKS, R. R.; BROOKS, R. R. Phytoremediation by volatilisation. **Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining**. Wallingford, p. 289-212, 1998. **Pollution-and-Degradation; Erosion-Soil-and-Water-Conservation** (CD). Resumo.
- BROOKS, R. R.; LEE, J.; REEVES R. D.; JAFFRÉ, T. Detection of nickelireous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. **Journal Geochem. ExplorN**, London, v. 7, p. 49-57, 1977. Resumo.
- BROOKS, R. R.; ROBINSON, B. H.; BROOKS, R. R. The potential use of hyperaccumulator and othrer plants for phytomining. In: **Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining**. Palmerston

- North, p. 327-356, 1998. **Biological-Resources-Plant; Pollution-and-Degradation** (CD). Resumo.
- BROWN, K. S. The green clean. **BioScience**, Columbia, v. 45, n. 9, p. 579-582, 1995. **Pollution-and-Degradation; Biodegradation-Organisms** (CD). Resumo.
- BROWN, S.L.; CHANEY, R. L.; ANGLE J. S. et al. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and Bladder Campion for zinc and cadmium contaminated soil. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 23, p. 1151-1157, 1994.
- BROWN, K. S.; DONNELLY, K. C. Influence of soil environment on biodegradation of a refinery and petrochemical sludge. **Environmental Pollution**, London, v. 6, n. 2, p. 119-132, 1983. **CAB : OS Soils-and-Fertilizers**, 1984. Ref. 047-00833. Resumo.
- BROWN, K. C.; DONNELLY, K. C; DEUEL, L. E. Effects of mineral nutrients, sludge application rate, and application frequency on biodegradation of two oily sludges. **Microbial Ecology**, New York, v. 9, n. 4, p. 363-373, 1983. **CAB : OS Soils-and-Fertilizers**, 1984. Ref. 047-13454. Resumo.
- BURKEN, J. G.; SCHNOOR, J. L. Uptake and metabolism of atrazine by poplar trees. **Environmental Science and Technology**, New York, v. 31, n. 5, p. 1399-1406, 1997. **Forestry-General; Plant-Physiology-and-Biochemistry** (CD). Resumo.
- CARR, R. H. Vegetative growth in soils containing crude petroleum. **Soil Science**, Baltimore, v. 8, p. 67-68. 1919.
- CARVALHO, F. J. P. C.; ALMEIDA, M. H. L.; FALKIEWICKS, F. H. SIMPÓSIO INTERNACIONAL : "POLUIÇÃO EM GRANDES CIDADES - CIÊNCIA E TECNOLOGIA PARA PLANEJAMENTO DA QUALIDADE AMBIENTAL" **Desenvolvimento de tecnologia para tratamento de resíduos de toxicidade variável no sistema de Landfarming**, Padova, 1995.
- CARVALHO, F. J. P. C.; ALMEIDA, M. H. L. **PETROBRAS High efficiency Landfarming Sistem: "New for Biodegradable Toxic Industrial Wastes"**. In: **Biodeterioration and Biodegradation**, DECHEMA Monographs, Hamburg, v. 133, p. 535-542, Sept. 1996.
- CASARINI, D. C. P.; CUNHA, R. C. A ; SATO, M. I. Z. et al. Evaluation of toxicity test procedure to define loading rates in land treatment system. **Water Science and Technology**, v. 24, n. 12, p. 183-188, 1991. **CAB: 7L Biodeterioration-Abstracts**, 1992. Ref. 006-02063. Resumo.
- CHANEY, R. L. Zinc Phytotoxicity. In: ROBSON, A. D. **Zinc in Soils and Plants**. Perth : Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 135-144.
- COLEMAN, D. C.; CROSSLEY Jr, D. A. **Fundamentals of Soil Ecology**. London : Academic Press, 1995.
- COMIS, DON. Green remediation: Using plants to clean the soil. **Journal of soil and water conservation**, Beltsville, v. 47, n. 4, July, 1992.
- CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, Resolução nº 9 de 31 de Agosto de 1993.

- CRAIG, H.; WAKEMAN, J.; CHANNELL J. **Solidification/stabilization of metals and explosives in soil**. Palestra apresentada no HSRC/WERC Joint Conference on the Environment, Maio, 1996. Great Plains/Rocky Mountain Hazardous Substance Research Center. Site internet [www.engg.ksv.edu/HSRC/96Proceed/gardeal.html](http://www.engg.ksv.edu/HSRC/96Proceed/gardeal.html).
- CRAWFORD, S. L.; JOHNSON, G. E.; GOETZ, F. E. The potential for bioremediation of soils containing PAHs by composting. **Compost Science and Utilization**, v. 1, n. 3, p. 41-47, 1993.
- CUNNINGHAM, S. D.; OW, D. W. Promises and prospects of phytoremediation. **Plant Physiology**, Newark, v. 110, n. 3, p. 715-719, 1996.
- CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. et al. Phytoremediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 56, p. 55-113, 1996.
- DEWOLF, G. B.; NELSON, T. P. Alternatives to land treatment of refinery sludges. In: ENCONTRO ANUAL DA APCA (1988 : Dallas) Dallas : EPCA, 1988, p. 1-13.
- DIBBLE, J. T.; BARTHA, R. Effect of environmental parameters on the biodegradation of oil sludge. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 37, n. 4, p. 729-739, 1979a. CD: **Soil-Biology; Materials-Science**. Resumo.
- \_\_\_\_\_. Rehabilitation of oil-inundated agricultural land: a case history. **Soil Science**. Baltimore, v. 128, n. 1, p. 56-60, 1979b.
- EBBS, S. D.; KOCHIAN, L. V. Phytoextraction of zinc by oat (*Avena sativa*), barley (*Hordeum vulgare*), and Indian mustard (*Brassica juncea*). **Environmental Science and Technology**, New York, v. 32, n. 6, p. 802-806, 1998. **Plant-Nutrition; Pollution-and-Degradation** (CD). Resumo.
- ECKENFELDER Jr, W. W.; NORRIS, R. D. Applicability of Biological Processes for Treatment of Soils. In: TEDDER; POHLAND. **Emerging Technologies in Hazardous Waste Management III**. 1993, cap. 8, p. 138-158.
- EDWARDS, J. M.; KELLY, J. M.; SHERMAN, R. E. Red spruce and loblolly pine nutritional responses to acid precipitation and ozone. **Environmental Pollution**, London, v. 89, n. 1, p. 9-15, 1995. Resumo.
- EKEBERG, D.; JABLONSKA, A. M. OGNER, G. Phytol as a possible indecator of ozone stress by *Picea abies*. **Environmental Pollution**, London, v. 89, n. 1, p. 55-58, 1995. Resumo.
- EMATER - EMPRESA PARANAENSE DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. **A Cultura da Erva-Mate**, Curitiba, 1989.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa agropecuária, Ministério da Agricultura, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solo, 1979.
- ENTRY, J. A.; EMMINGHAM, W. H. Influence of vegetation on microbial degradation of atrazine and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in riparin soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 76, n. 1, p. 101-106. 1996.
- EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas**. São Paulo : Livros Técnicos e Científicos, 1975.

- ERNST, W. H. O.; FUGE, R.; BILLET, M.; SELINUS, O. Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants. **Applied Geochemistry**, Amsterdam, v. 11, p. 163-167, 1996. **Pollution-and-Degradation; Biological-Resources-Plant** (CD). Resumo.
- FERMOR, T. R. Applied aspects of composting and bioconversion of lignocellulosic materials: an overview. **International Biodeterioration and Biodegradation**, Littlehampton, v. 31, n. 2, p. 87-106, 1993. **CAB : 1F Forest-Products-Abstracts**, 1994, Ref. 017-01259. Resumo.
- FLATHMANN, P. E.; LANZA, G. R. Phytoremediation: Current Views on na Emerging Green Technology. **Journal of Soil Contamination**, Boca Raton, v. 7, n. 4, p. 415-432, 1998.
- FRANKOS, N. H.; GOUIN, F.; SIKORA, L. J. Using woodchips of specific species in composting. **BioCycle**, Annapolis, v. 23, n. 3, p. 38-40, 1982. **CAB : 1F Forest-Products-Abstracts**, 1983, Ref. 006-01735. Resumo.
- GANDHI, P.; ERICKSON, L. E.; FAN, L. T. **Dissolution and biodegradation of a mixture of immiscible liquids**. Palestra apresentada no Palestra apresentada no HSRC/WERC Joint Conference on the Environment, Maio, 1996. Great Plains/Rocky Mountain Hazardous Substance Research Center. Site internet [www.engg.ksv.edu/HSRC/96Proceed/gardeal.html](http://www.engg.ksv.edu/HSRC/96Proceed/gardeal.html).
- GATLIFF, E. G. Vegetative remediation process offers advantages over traditional pump-and-treat technologies. **Remed. Summer**, v. 4, n. 3, p. 343-352, 1994.
- GLIMMERVEEN, I. Should trees now be more actively used in the rehabilitation of heavy metal contaminated sites? **Vegetation management in forestry, amenity and conservation areas: managing for multiple objectives**, New York, n. 44, p. 357-361, Mar. 1996. **Protection-Forestry; Pollution-and-Degradation** (CD). Resumo.
- GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental**. 12. ed. Piracicaba : Nobel, 1987.
- GONÇALVES, C. M. **Avaliação do uso de microrganismos da camada reativa do landfarming para acelerar o processo de biodegradação em áreas de biorremediação**. Curitiba, 1997. Monografia, Departamento de Ciências Biológicas, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
- GRAHAM, R. D.; RENGEL, Z. Genotypic Variation in Zinc Uptake and Utilization by Plants. In: ROBSON, A. D. **Zinc in Soils and Plants**. Perth : Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 107-114.
- GRENIER, Y. Value of wastewater sludges for forest fertilization. **Memoire Direction de la Recherche Appliquee, Direction de la Recherche et du Developpement**, Ministere de l'Energie et des Ressources (Forests), Sainte Foy, Quebec, n. 98, xx + 190p, 1989. Resumo.
- GRUIZ, K.; KRISTON, È. **In Situ Bioremediation of Hydrocarbon in Soil**. Boca Raton, v. 4, n. 2, p. 163-173, 1995.
- GUDIN, C.; SYRATT, W. J. Biological aspects of land rehabilitation following hydrocarbon contamination. **Environmental Pollution**, London, v. 8, p. 107-112, 1975.

- HARMSSEN, J. Possibilities and limitations of landfarming for cleaning contaminated soils. **On site bioreclamation; processes for xenobiotic and hydrocarbon treatment**, Boston, p. 255-272, 1991. **CAB : 7L Biodeterioration-Abstracts**, 1993, Ref. 007-01255. Resumo.
- HILDEBRAND, C. Manual de análise química de solos e plantas. Curitiba. Universidade Federal do Paraná. (mimeografiado), 1976.
- HUESEMANN, M. H. Guidelines for land treating petroleum hydrocarbon-contaminated soils. **Journal of Soil Contamination**, Boca Raton, v. 3, n. 3, p. 299-318, 1994.
- HUESEMANN, M. H.; MOORE, K. O. Compositional changes during landfarming of weathered Michigan crude oil-contaminated soil. **Journal of Soil Contamination**, Boca Raton, v. 2, n. 3, p. 245-264, 1993.
- HUNGRIA, M.; URQUIAGA, S. Transformações microbianas de outros elementos (Potássio, Micronutrientes e Metais Pesados). In: CARDOSO, E. J. B. N. **Microbiologia do solo**. Piracicaba : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992.
- IPARDES - SECRETARIA DO ESTADO DO PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL CONSELHO ESTADUAL DE INFORMÁTICA E INFORMAÇÕES - CEI. Normas para apresentação gráfica de dados - Tabelas. Curitiba, 1995.
- IPEF - SIF. **Manual de pragas em florestas**. Programa cooperativo de monitoramento de insetos em florestas. Curitiba, v. 2, 1993.
- JACOBSEN, C. S. Plant protection and rhizosphere colonization of barley by seed inoculated herbicide degrading *Burkholderia (Pseudomonas) cepacia* DBO!(pRO101) in 2,4D contaminated soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 189, p. 139-144, 1997.
- JAFFRÉ, T.; BROOKS, R. R.; LEE, J.; REEVES, R. D. *Sebertia acuminata*: A Hyperaccumulator of Nickel from New Caledonia. **Science**, v. 193, p. 579-580, 1976.
- JENKINSON, D. S. Formation of microbial biomass during the decomposition of <sup>14</sup>C labelled ryegrass in soil. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 32, p. 619-620, 1981.
- \_\_\_\_\_. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. IV. The decomposition of fumigated organisms in soil. **Soil biology and Biochemistry**, Oxford, v. 8, p. 203-208, 1976.
- JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. I. Fumigation with chloroform. **Soil biology and Biochemistry**, Oxford, v. 8, p. 167-177. 1976.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3. ed. Boca Raton : CRC, 1985.
- KANEKAR, P.; KUMBHOJKAR M. S. et al. Evaluation of *Acacia nilotica* (L.) Del e *Casuarina equisetifolia* Forst. for tolerance and growth on microbially treated dyestuff wastewater. **Environmental Pollution**, London, v. 81, n. 1, p. 47-50, 1993. Resumo.
- KELLER, J.; RATHBONE K.; BANKS, M. K. et al. Effect of soil depth and root



surface area on the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons, 1996. Site internet [www.rtdf.org/phyttomin.htm](http://www.rtdf.org/phyttomin.htm)

KIMBALL, S. L.; WISE, D. L.; TRANTOLO, D. J.; The use of surfatants to enhance pump and treat processes for in situ soil remediation.

**Environmental Science and Pollution Control**, New York, n. 8, 1994.

**Pollution-and-Degradation; Erosion-Soil-and-Water-Conservation** (CD). Resumo.

KIRCHMANN, H; BERNAL, M. P. Organic waste treatment and C stabilization efficiency. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 29, n. 11-12, p. 1747-1753, 1997.

KRAMER, U.; SMITH, R. D.; WENZEL, W. W.; RASKIN, I.; SALT, D. E. The role of metal transport and tolerance in nickel hyperaccumulation by *Thlaspi goesingense* Halacsy. **Plant Physiology**, Newark, v. 115, n. 4, p. 1641-1650, Dec., 1997.

LIGO, M. A. V. Efeito da aplicação de lodo da estação de tratamento do SITEL/CORSAN na absorção de nutrientes e metais pesados pelas plantas - primeiro ano de cultivo. Porto Alegre, 1988. Dissertação de Mestrado em Ciência do solo - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LINE, M. A. Compost recycling of wood fiber waste produced by paper manufacture. **Compost recycling of wood fiber waste produced by manufacture**, Hobart, v. 3, n. 1, p. 39-45, 1995. **Silviculture; Pollution-and-Degradation** (CD). Resumo.

LONGNECKER, N. E.; ROBSON, A. D. Distribution and Transport of Zinc in Plants. In: ROBSON, A. D. **Zinc in Soils and Plants**. Perth : Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 79-89.

LYNCH, J. Land treatment of hydrocarbon contaminated soils. In: KOSTECKI P. T.; CALABRESE, E. J. **Petroleum Contaminated Soils**. Chelsea : Lewis Publishers, 1989. v. 1, p. 163-174.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental : metais pesados, mitos, mistificações e fatos**. São Paulo : ProduQuímica, 1994.

\_\_\_\_\_. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo : Editora Agronômica Ceres, 1980.

\_\_\_\_\_. **Manual de química agrícola**. São Paulo : Editora Agronômica Ceres, 1976.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 5. ed. Sandiego, : Academic press inc. 1993a.

\_\_\_\_\_. Zinc Uptake from Soils. In: ROBSON, A. D. **Zinc in Soils and Plants**. Perth : Kluwer Academic Publishers, 1993b. p. 59-71.

MCCUTCHEON, S. **Phytoremediation of organic compounds: validation approaches for field testing and research needs**. Palestra apresentada no Workshop phytoremediation of organics' contaminants, 1996. Valor do Fort, Dec. 1996. Site internet [www.rtdf.org/phyttomin.htm](http://www.rtdf.org/phyttomin.htm)

MEDALIE, L. BOWDEN, W. B.; SMITH, C. T. Nutrient leaching following land

- application of aerobically digested municipal sewage sludge in a northern hardwood forest. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 23, n. 1, p. 130-138, 1994. Resumo.
- MENG, F. R.; BOURQUE C. P. A. et al. Foliage responses of spruce trees to long-term low-grade sulfur dioxide deposition, **Environmental Pollution**, London, v. 90, n. 2, p. 143-152, 1995.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of Plant Nutrition**. 4. ed. Bern : International Potash Institute, 1987.
- \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2. ed. Bern : International Potash Institute, 1975.
- MENZIES, J. D. Fungi. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison : American Society of Agronomy, 1965.
- MIELNICZUK, C. **A população microbiana e a degradação de resíduo petroquímico no solo**. Porto Alegre, 1991. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MORELLI, I. S.; VECCHIOLI, G. I.; PANNO, M. T. et al. Assessment of the toxic potential of hydrocarbon containing sludges. **Environmental Pollution**, London, v. 89, n. 2, p. 131-135, 1995.
- NASCIMENTO NETO, D. Metodologia para bioindicadores de biorremediação do solo com resíduos de atividades petrolíferas. In: 4º EVINCI Evento de Iniciação científica da UFPR (4. 1996: Curitiba). **Anais...** Curitiba : UFPR, 1996. p. 371.
- NASH, J. H.; TRAVER, R. P. Field studies of in situ soil washing. In: KOSTECKI P. T.; CALABRESE, E. J. **Petroleum Contaminated Soils**, Chelsea : Lewis Publishers, v. 1, p. 157-161, 1989.
- NEDER, R. N. **Microbiologia Manual de Laboratório**. São Paulo: Nobel, 1992.
- PANIGRAHI, A. K; KONAR, S. K. Pollutational impact of petroleum refinery effluent in presence of nonionic detergent on aquatic ecosystem. **Environment and Ecology**, Kalyani, v. 10, n. 1, p. 92-96, 1992. **CAB : OS Soils-and-Fertilizers** (CD), 1992, Ref. 055-10148. Resumo.
- PAULINO, L. Espécies florestais como bioindicadores de biorremediação de áreas com resíduos de refinarias. In: 4º EVINCI Evento de Iniciação científica da UFPR (4. 1996: Curitiba). **Anais...** Curitiba : UFPR, 1996. p. 371.
- PETERSON P. J. Adaptation to Toxic Metals. In: ROBB, D. E.; PIERPOINT, W. S. **Metals and micronutrients: Uptake and utilization by plants**. London : Academic Press, 1983. p. 51-69.
- PETROBRAS. **Manual de operação do Landfarming**. Curitiba, Petróleo Brasileiro S.A. REPAR/DIOPE/SETRAE. Documento interno, 1995.
- PHILIPP, W.; STRAUCH, D. Studies on the hygiene and disease problem with the application of sewage sludge in forest stands. **Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung**, Stuttgart, n. 33, p. 111-113, 1987. **CAB : OF Forestry-Abstracts**, 1990, Ref. 051-01262. Resumo.

- PRADO, M. A.; LÓPEZ M. S.; BOISSIERE, J. Recuperacion de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el uso de leguminosas inoculadas. **Vision Tecnologica**, Caracas, v. 1, n. 2, 1995.
- PRESON, K. T. Federal integrated biotreatment research consortium: flask to field. Palestra apresentada no HSRC/WERC Joint Conference on the Environment, Maio, 1996. Great Plains/Rocky Mountain Hazardous Substance Research Center. Site internet [www.engg.ksv.edu/HSRC/96Proceed/gardeal.html](http://www.engg.ksv.edu/HSRC/96Proceed/gardeal.html).
- PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba : Salesward-Discovery, 1996.
- PURI, A. N.; ASGHAR, A. G. Influence of salts and soil-water ratio on pH value of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 46, p. 249-257, 1938.
- PURI, A. N.; UPPAL, H. L. Action of carbon dioxide on soils. **Soil Science**, Baltimore, v.-, 1937.
- RANGEL, C. M. P.; FRANTZ, J. H.; BASTIANI, M. Landfarming for treatment and disposal of oily wastes originating in the South Petrochemical Complex. **Water Science and Technology**, v. 20, n. 10, p. 221-230. 1988. **CAB: OS Soils-and-Fertilizers**, 1989, Ref. 052-05576. Resumo.
- RICHARDSON, M.; JESSIMAN, B. The Canadian National Contaminated Site Remediation Program (NCSRP): Activities in Support of Health Protection Objectives. In: \_\_\_\_\_. **Hydrocarbon Contaminated Soils**. Chelsea : Lewis Publishers, 1992. p. 21-33.
- ROCK, S. **Phytoremediation of organic compounds: mechanisms of action and target contaminants**. Palestra apresentada no Workshop phytoremediation of organics contaminants, 1996. Valor do Fort, Dec. 1996. Site internet [www.rtdf.org/phyttomin.htm](http://www.rtdf.org/phyttomin.htm)
- ROGERS, H. G.; BEYROUTY, C. A.; NICHOLS, T. D. et al. Selection of Cold-Tolerant Plants for Growth in Soils Contaminated with Organics. **Journal of Soil Contamination**, Boca Raton , v. 5, n. 2, p. 171-186. 1996.
- SANTOS FILHO, A.; TOURINHO, L. C. N. Caracterizações analíticas de lodo e interpretações para fins agrícolas e florestais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 29-35, 1981.
- SCHOLLENBERGER, C. J. Effect of leaking natural gas upon the soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 29, p. 261-266, 1930.
- SHUVAL, H.; JODICE, R.; CONSIGLIO, M.; SPAGGIARRI, G.; SPIGONI, C. Control of enteric micro-organisms by aerobic-thermophilic co-composting of wastewater sludge and agro-industry wastes. **Water Science and Technology**, v. 24, n. 2, p. 401-405, 1991.
- SKLADANY, G. J.; METTING Jr, F. B.; BLAINE, F. Bioremediation of contaminated soil. Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management. **Books in Soils, Plants, and The Environment**, New York, p. 483-513, 1992.
- STRATTON, M. L.; BARKER, A. V.; REHCIGL, J. E. et al. Compost. **Soil amendments and environmental quality**. Ona, p. 249-309, 1995. **Soil-Fertility; Fertilizers-and-other-Amendments** (CD). Resumo.

STRAUCH, D.; KONIG, W.; PHILIPP, W. et al. Survival of Salmonella and Ascaris eggs during sewage sludge utilization in forests. **Zentralblatt fur Bakteriologie Mikrobiologie und Hygiene**, Stuttgart, v. 174, n. 5, p. 461-470, 1981.

TAKAMATSU, A. A. **Avaliação da biolixiviação de metais pesados por bactérias do gênero *Thiobacillus* em lodos biológicos para utilização agrícola como fertilizante**. Curitiba, 1996. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

THOMPSON, P. L.; RAMER, L. A.; SCHNOOR, J. L. Uptake and transformation of TNT by hybrid poplar trees. **Environmental Science and Technology**, New York, v. 32, n. 7, p. 975-980, 1998. **Forestry-General; Pollution-and-Degradation** (CD). Resumo.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA - BIBLIOTECA CENTRAL. Citações e notas de rodapé. Curitiba. 1994a.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA - BIBLIOTECA CENTRAL. Estilo e orientação para datilografia e digitação. Curitiba. 1994b.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA - BIBLIOTECA CENTRAL. Normas para apresentação de trabalhos - Referencias Bibliográficas. Curitiba. 1994c.

VANDECAVEYE, S. C. Microbial activity in relation to organic matter transformation. **Soil Science** (Thirt Com. Int. Soc. Soil Science), Baltimore, p. 130-132, 1939.

WOODWARD, D. **Panel discussion on the use of phytoremediation to clean up pesticides, wood preservatives, chlorinated solvents, munition waste, and mixed waste**. Palestra apresentada no Workshop phytoremediation of organics contaminants, 1996. Valor do Fort, Dec. 1996. Site internet [www.rtdf.org/phyttomin.htm](http://www.rtdf.org/phyttomin.htm)